

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

MAGISTER EN INGENIERIA ELECTRICA

PROYECTO DE GRADO

SISTEMA DE VAR ESTÁTICO PARA COMPENSACION DEL
FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION

FREDY HELY RENGIFO BLANDON

Pereira, junio de 2014

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Listado de tablas.....	3
Listado de figuras.....	4
Capitulo 1 Introducción.....	7
Capítulo 2 Sistemas de distribución	11
Capítulo 3 El compensador de var estático SVC	19
Capítulo 4 Estrategias de control aplicadas al SVC	38
Capitulo 5 Resultados experimentales	59
Capitulo 6 Conclusiones	82

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Cuadro de cargas mensual por etapa de fabricación.....	12
Tabla 1.2 (a) Medición de pérdidas de vacío	16
Tabla 1.2 (b) Medición de pérdidas en carga	17
Tabla 2 Base de conocimiento control difuso nueve reglas.....	44
Tabla 3 Base de conocimiento control difuso 49 reglas.....	46
Tabla 4 Base de reglas difuso (basado en control clásico de un SVC)	48
Tabla 5 Comparación de las diferentes estrategias de control simuladas	57
Tabla 6 Listado de materiales utilizados para la construcción del prototipo	61

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 (a) Circuito equivalente para medición de pérdidas en vacío (b) circuito equivalente para medición de pérdidas bajo carga (también aplicable para prueba de calentamiento y sobrecarga)	14
Figura 2.2 Modelo R,L serie trifásico conectado en estrella para fines de compensación de reactivos que representa un transformador trifásico durante la medición de pérdidas de vacío ó carga (se registran potencia activa P, reactiva Q, corriente I_a y voltaje E_a) ...	17
Figura 3.1 Capacitor serie controlado por tiristor TCSC	21
Figura 3.2 Compensador en derivación controlado por tiristor (TCR-TSC)	21
Figura 3.3 (a) Esquema básico SVC en compensación continua, (b) característica V vs. I	22
Figura 3.4 (a) Esquema básico control PI y (b) señal de salida con dos diferentes factores de ajuste (izq. control P y derecha control integral I)	26
Figura 3.5 Control proporcional integrativo PI (ambiente PSCAD)	27
Figura 3.6 Esquema control difuso y conjunto de reglas (que conforman un defuzificador con inferencia de máximos y mínimos)	28
Figura 3.7 Esquema de control difuso aplicado al proyecto (ambiente PSCAD)..	29
Figura 3.8 Red Neuronal Artificial ANN (izquierda). Pesos de interconexiones y funciones de activación o salida (derecha).....	30
Figura 3.9 Tres reglas de inferencia percibidas como red neuronal.....	31
Figura 3.10 Arquitectura ANFIS (red adaptiva basada en sist. de inferenc. difuso)	32
Figura 3.11 Red neuronal híbrida difusa	32
Figura 3.12 Control neurodifuso ambiente PSCAD (a) red neuronal híbrida (b)...	33
Figura 3.13 Ctrl. Neurodifuso, parámetros entrenado por alg. genéticos (PSCAD)..	35
Figura 4.1 Diagrama general del SVC	38
Figura 4.2 Esquema red neuronal adaptiva de cuatro capas basada en algoritmo Chao et al	40

	Pág.
Figura 4.3 Esquema básico control neurodifuso algoritmo Chao et al (ambiente PSCAD)	41
Figura 4.4 Respuestas control neurodifuso algoritmo Chao et al.....	41
Figura 4.5 Esquema básico control neurodifuso algoritmo Li Xi Wang (ambiente PSCAD).....	42
Figura 4.6 Respuestas esquema control neurodifuso Li Xi Wang.....	43
Figura 4.7 Esquema control difuso nueve reglas.....	44
Figura 4.8 Respuesta del control difuso nueve reglas operando con entradas de prueba	45
Figura 4.9 Respuesta del SVC con control difuso nueve reglas	45
Figura 4.10 Respuesta ctrl. difuso 49 reglas operando con entradas de prueba	47
Figura 4.11 Respuesta del SVC con control difuso 49 reglas.....	47
Figura 4.12 Esquema básico control clásico (PI) (ambiente PSCAD)	48
Figura 4.13 Respuesta ctrl. difuso 9 reglas (base de reglas ctrl. clásico del SVC). 49	
Figura 4.14 Esquema control difuso 9 reglas (base de reglas ctrl. clásico SVC)... 49 (ambiente PSCAD)	
Figura 4.15 Respuestas del SVC operando con ctrl. difuso nueve reglas y estrategia de control similar a la de un control clásico	50
Figura 4.16 Esquema básico control clásico (PI) (ambiente PSCAD)	51
Figura 4.17 Respuesta del SVC con control clásico (PI) (lim sup=1, lim inf=-0.6 y constante de tiempo = 0.004s)	51
Figura 4.18 Algoritmo genético, etapas constitutivas	53
Figura 4.19 Red neuronal 8-4-4-4-1 que opera bajo la filosofía del control neuro-difuso con algoritmos genéticos (ambiente Simulink)	54
Figura 4.20 Esquema básico control difuso con algoritmos genéticos	56
Figura 4.21 Respuestas del SVC control difuso con algoritmos genéticos	56
Figura 5.1 Vista general del prototipo del SVC	60

	Pág.
Figura 5.2 Diagrama de bloques del proceso de control del SVC, incluyendo acondicionamiento de señales.....	62
Figura 5.3 Banco de tres transformadores monofásicos YNyn0	63
Figura 5.4 Esquema básico amplificador operacional	64
Figura 5.5 Formas de onda de voltaje del detector de cruce por cero. Voltajes de entrada no inversora y de salida (a), montaje real trifásico.....	64
Figura 5.6 Gráfico señal de muestreo	65
Figura 5.7 Rectificador de onda completa	66
Figura 5.8 (a) Gráfica del voltaje de referencia $5V_{pico}$, $f = 60\text{Hz}$ (b) Variación (b) Variación máx. y mínima de la señal de entrada ($5V_{pico} \pm 10\%$)	67
Figura 5.9 Gráfico del error de voltaje (%) (entre voltaje de referencia y voltaje muestreado)	68
Figura 5.10 Gráfico de la derivada del error de voltaje	69
Figura 5.11 Montaje real circuito de control	70
Figura 5.12 Gráfico algoritmo general de control	71
Figura 5.13 Salida u, algoritmo de control difuso 9 reglas previo al acondicionamiento	73
Figura 5.14 Triángulo del fp (el algoritmo de ctrl. determina la acción adecuada para mantener voltaje de salida en rango de $\pm 10\%$ valor de ref.)	73
Figura 5.15 Circuito de potencia (actuador)	74
Figura 5.16 Inductancia L. Diseño y construcción final	75
Figura 5.17 Esquema del circuito de control y potencia	76
Figura 5.18 Comportamiento del SVC	76
Figura 5.19 Resultados reales modelo SVC con algoritmo Chao Et Al	78
Figura 5.20 Resultados reales modelo SVC con algoritmo Li Xi Wang.....	79
Figura 5.21 Resultados reales modelo SVC con algoritmo difuso 9 reglas	79
Figura 5.22 Resultados reales SVC algoritmo de control 9 reglas basado PI ...	80

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. GENERALIDADES

Uno de los principales paradigmas en que se enmarca la tecnología moderna es la de realizar los procesos de fabricación empleando cada vez menos energía. Esto produce una reducción de los costos operacionales proporcionando un aporte no despreciable a las organizaciones en aras de incrementar las utilidades del ejercicio productivo.

En el caso de un sistema eléctrico de distribución un análisis objetivo de la operación del mismo, destaca aspectos como eficiencia, localización optima de componentes y la habilidad para soportar contingencias durante el servicio, una maniobra o la incidencia de un agente externo. Para realizar este análisis objetivo, ya no es necesario elaborar complejos desarrollos matemáticos ó enfrascarse en tortuosos procesos de prueba y error; actualmente se dispone de herramientas de simulación de gran utilidad que permiten planificar los cambios, realizarlos, verificar la respuesta del sistema y finalmente comparar los beneficios obtenidos, antes de implementar una solución. La precisión de los resultados obtenidos depende de la eficacia de la simulación.

Mediante el presente trabajo de investigación se analizan algunos tipos de compensadores de reactivos y se escoge el de mayor aplicabilidad para una carga RL (transformador eléctrico de distribución durante la medición de pérdidas en carga y durante la prueba de calentamiento y sobrecarga). También, se comparan diferentes tipos de control aplicados y se determina el de mejor desempeño. Finalmente se verifican los resultados por experimentación implementada físicamente.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

Estudiar la compensación de reactivos de un sistema de distribución genérico con topología RL, mediante diferentes mecanismos de control, estableciendo por comparación directa el que brinde :

- Menor complejidad de programación con la misma o mejor prestación.
- Más rápida respuesta del sistema y la mayor estabilidad.
- Menor número de componentes análogos ...mayor confiabilidad.

1.3. BREVE DESCRIPCION DEL PROYECTO

En el caso particular del presente trabajo de investigación se analizó un sistema eléctrico de distribución con bajo factor de potencia (fp). Se simula un compensador de var estático (SVC) corrigiendo el fp por medio de varias alternativas de control. Los resultados obtenidos son graficados y comparados entre sí. Finalmente se realizó montaje circuital del compensador y se registran las graficas de los variables de entrada y salida, constatando el correcto funcionamiento del SVC y la adecuada tendencia de los resultados reales versus los obtenidos en la etapa de simulación.

Como aplicación practica del SVC simulado y posteriormente implementado en circuito real, se analiza un proceso de manufactura industrial. En este caso por disponibilidad de información se analiza la fabricación de transformadores eléctricos de distribución y la aplicabilidad particular del SVC en la corrección del fp. Como cualquier sistema de distribución típico se estudian las diferentes etapas del proceso destacando la atención en aquella de mayor impacto en materia de consumo de reactivos. Es así, como la implementación adquiere más importancia en la etapa de pruebas eléctricas (específicamente en la medición de pérdidas y en la prueba de calentamiento); debido a

que refleja el más bajo fp. Razón por la cual es considerada como una de las partes más sobresalientes del proceso de manufactura (alta demanda de reactivos y mayor capacidad instalada en los equipos de alimentación).

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El capítulo dos resume la selección de la etapa de pruebas eléctricas como sección a compensar; igualmente resume la composición de las pruebas eléctricas y presenta las razones que generan el bajo fp durante la medición de pérdidas. Finalmente sustenta el circuito equivalente del transformador eléctrico más apropiado; dejando el camino libre para la simulación del proceso. El capítulo tres presenta la teoría del compensador de var estático (SVC) y sus diferentes esquemas de operatividad.

El capítulo cuatro reconstruye varias experiencias de simulación logradas a través del ambiente gráfico del software y mediante el uso de los modelos circuitales ajustados a cada tipo de prueba (medición de pérdidas en carga y prueba de calentamiento o sobrecarga). Para dicho propósito se plantean varias estrategias de control aplicadas al SVC, que utilizan conceptos de: control moderno (PI), control difuso, control neurodifuso y control neurodifuso con parámetros entrenados por medio de algoritmos genéticos.

Finalmente mediante comparación se determina la estrategia de control de mayor aceptación, por rapidez de respuesta, poca inestabilidad y mayor similitud con la salida objetivo.

El capítulo cinco retoma cada una de las estrategias desarrolladas en el capítulo cuatro y mediante un prototipo logra la obtención de resultados reales que corroboran el buen desempeño de la herramienta de simulación. Para ello se trabajó con un circuito RL que se asemeja para fines prácticos al circuito equivalente del transformador de distribución durante las pruebas de medición de pérdidas en carga y prueba de calentamiento y sobrecarga. Parte de este último capítulo presenta información relacionada con el hardware utilizado en la investigación. Se analiza también de manera práctica cada bloque componente del control y su contribución al montaje general.

1.5. OBJETIVO ESPECIFICO

Crear diferentes escenarios logrados a través de simulación y verificarlos en la práctica con un circuito real implementado, para ayudar a la toma de decisiones que reduzcan el consumo de energía eléctrica (menor impacto ambiental en un sistema de distribución típico RL, como es el caso de un transformador eléctrico de distribución durante la prueba de medición de pérdidas en vacío, en carga o durante la prueba de sobrecarga).

CAPITULO 2

SISTEMAS DE DISTRIBUCION

2.1. GENERALIDADES

Los sistemas eléctricos cumplen con tareas específicas dentro de cualquier proceso de producción, con rapidez, confiabilidad, y eficiencia. Esta eficiencia cobija también baja generación de un impacto ambiental (el menor consumo energético posible).

De acuerdo a lo expuesto para cualquier sistema de distribución se debe considerar su eficiencia energética. Una solución que mejora este parámetro; es la instalación de compensadores que logren reducir esa ineficiencia y al final lograr una reducción en el impacto ambiental.

En el presente trabajo se analizan los sistemas eléctricos de distribución en una fábrica de transformadores eléctricos y se destacan aquellas etapas del ciclo de fabricación donde hay alta ineficiencia energética; de esta manera se puede compensar con una buena tasa de retorno de la inversión.

2.2. EL TRANSFORMADOR ELECTRICO DE DISTRIBUCION

Aunque silencioso y desapercibido por naturaleza, es de gran importancia en la cadena de valor de cualquier proceso de manufactura ó servicio y de manera indirecta hace su contribución en casi todas las actividades de la vida diaria.

El transformador de hoy ha ido incorporando cada vez con más eficacia conceptos de alta eficiencia y productividad. Como resultado el producto eleva su rendimiento (menores pérdidas) y reduce su costo (menores materiales involucrados en su

fabricación) aunque no siempre reduzca su tamaño. Además cada transformador elaborado ha sido construido a través de procesos de fabricación cada más controlados (aseguramiento de la calidad) y de mayor optimización de recursos físicos y logísticos.

En este sentido son de gran importancia los esfuerzos para reducir costos de fabricación; como es el caso del consumo de energía eléctrica, y que es la razón del presente trabajo: *montaje de un SVC como mecanismo corrector del fp durante la medición de pérdidas y durante la prueba de calentamiento y sobrecarga de transformadores eléctricos de distribución.*

La tabla 1 presenta los consumos de energía eléctrica en kW-h, fp promedio y de reactivos kVAR-h consumidos por mes, discriminados por etapa de fabricación perteneciente a una planta de transformadores típica. El fp en cada sección se estima controlado y estable; excepto durante las pruebas eléctricas, donde el fp puede variar entre 0.2 y 0.5. De hecho esta es la única etapa del ciclo productivo que no esta controlada y por su naturaleza no compensada demanda reactivos de la red.

Tabla 1. Cuadro de cargas mensual por etapa de fabricación. Cortesia ABB Transf. Dosquebradas

Etapa de fabricación	Energía eléctrica requerida (kW-h)	Factor de potencia promedio aprox.	Reactivos requeridos/proceso (kVAR-h)
Núcleos	710,4	1,0	0,0
Bobinas	107,8	1,0	0,0
Ensamble, conexiones y secado parte activa	327,2	1,0	0,0
Encube, vacío y llenado	24,3	1,0	0,0
Pruebas eléctricas	50,8	0,4	116,5
Producto Terminado	0,2	1,0	0,0
TOTAL kW-h requeridos	1220,6		
TOTAL kVAR- h requeridos			116,5

Un bajo fp durante las pruebas eléctricas exige equipos más robustos, que puedan suplir la demanda de corriente adicional; con más costos por capacidad instalada y por espacio físico disponible en sala de pruebas. Se establecen así; más razones de peso para implementar la compensación de reactivos durante las pruebas eléctricas; y se estructuran una serie de estrategias de control con un resultado común; obtener la máxima corrección del fp reduciendo notablemente la demanda de reactivos a la red, sin afectar la estabilidad y confiabilidad.

2.3. CARACTERISTICAS DE LAS PRUEBAS ELECTRICAS

2.3.1. Marco teórico

El conjunto de pruebas eléctricas efectuadas a los transformadores eléctricos es pieza clave para efectuar la revisión de cada unidad fabricada y la verificación de los diseños de cada producto. Por lo tanto, es parte fundamental del sistema de calidad de la fabrica de transformadores. Este conjunto de ensayos eléctricos se subdivide en pruebas de rutina, pruebas tipo y pruebas especiales [1]-[6]

2.3.2. Pruebas de rutina

1. Medida de relación de transformación, verificación de polaridad y relación de fase
2. Medición de la resistencia de devanados
3. Medición de la resistencia de aislamientos
4. Prueba de voltaje aplicado
5. Prueba de voltaje inducido
6. Medición de las pérdidas en vacío y corriente de excitación
7. Medición de las pérdidas bajo carga y voltaje de cortocircuito

2.3.3. Pruebas tipo (y según el caso pruebas especiales)

1. Calentamiento y sobrecarga
2. Descargas parciales
3. Impulso
4. Nivel de ruido, entre otras

De todas estas pruebas las que se caracterizan por presentar un bajo fp son: medición de las pérdidas en vacío, medición de las pérdidas bajo carga y prueba de calentamiento y sobrecarga.

Las dos primeras tienen una duración de 1 a 2 minutos por transformador y la última entre 3 y 24 horas por equipo, ya que depende del ciclo de carga simulado. Cabe anotar que las dos últimas pruebas se realizan efectuando el mismo tipo de conexión en el transformador en prueba, por lo tanto el circuito equivalente [7] a utilizar es el mismo (ver figura 2.1).

Una primera conclusión en términos de aplicabilidad es: el tiempo de duración de los ensayos o pruebas eléctricas, es mayor en la prueba de calentamiento y sobrecarga.

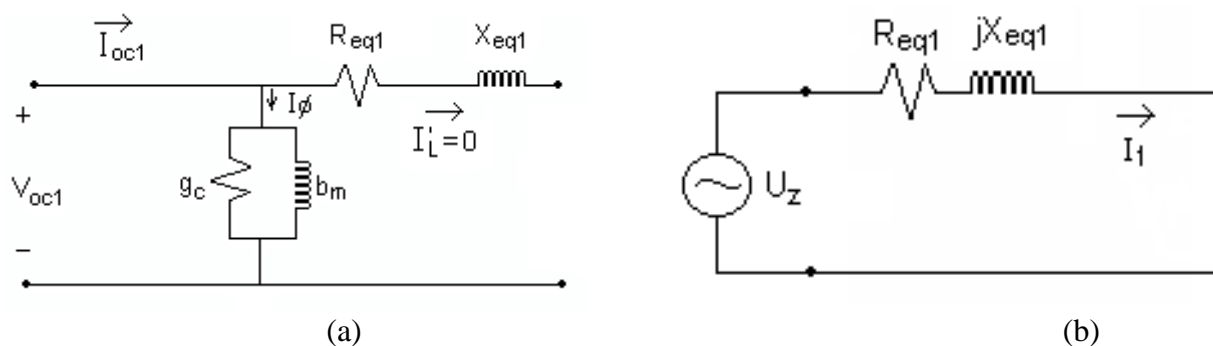


Figura 2.1 (a) Circuito equivalente para medición de pérdidas en vacío
(b) circuito equivalente para medición de pérdidas bajo carga (también aplicable para prueba de calentamiento y sobrecarga) [7]

2.3.4. Antecedentes del problema

La prueba de rutina de medición de pérdidas bajo carga resalta en el transformador su comportamiento inductivo, por lo que la red debe suministrar no solamente potencia activa, sino también considerable potencia reactiva. Este comportamiento indeseado se repite en la prueba de rutina de medición de pérdidas de vacío, e igualmente durante la prueba tipo de calentamiento y sobrecarga. Cuando el sistema de suministro eléctrico de la sala de pruebas detecta estas cargas de bajo fp solicita más potencia de la red y de inmediato se reduce la capacidad del barraje de alimentación; ya que toda su potencia aparente no puede ser entregada solamente como potencia activa, si no también como potencia reactiva de acuerdo al fp de la carga.

Entre las principales consecuencias de este fenómeno se encuentran:

1. Incremento en la potencia requerida de la sala de pruebas y a su vez de la red
2. Caída de voltaje en la carga
3. Desbalances de voltajes (debido a diferencias en los parámetros de los circuitos equivalentes del transformador en prueba)
4. Sobrecorrientes y calentamientos en conexiones y alimentadores
5. Mayor costo por prueba (por cobro de reactivos, siendo más ostensible en la prueba de calentamiento y sobrecarga por su gran duración)
6. Reducción de la capacidad del laboratorio para probar equipos de mediana potencia.

2.3.5. Circuito Equivalente

Para identificar una solución a este problema es necesario analizar el comportamiento circuital del transformador durante los ensayos de medición de pérdidas de vacío, medición de pérdidas en carga y calentamiento y sobrecarga.

Retomando los esquemas presentados en la figura 2.1 y asumiendo despreciable la rama en derivación, visible solo en el ensayo de medición de pérdidas de vacío, se determina que el circuito equivalente general es un RL básico; y el fp así como las cantidades de potencia reactiva demandadas varían de acuerdo a la potencia del transformador en prueba. La tabla 1.2 describe numéricamente esta situación.

Bajo las consideraciones anteriores y para efectos de simulación se plantea un modelo RL serie que tiene por objeto la compensación de reactivos. En la figura 2.2 se presenta dicho modelo generalizando el caso trifásico a analizar.

Tabla 1.2. (a) Medición de pérdidas de vacío

MONOFASICOS			TRIFASICOS		
kVA	f.p. a corregir	var requeridos	kVA	f.p. a corregir	var requeridos
10	0,2	244,9	30	0,125	1071,5
15	0,194	353,1	45	0,114	1564,7
25	0,2	489,9	75	0,118	2234,3
37,5	0,173	738,6	112,5	0,125	2902,1
50	0,168	936,4	150	0,125	3571,8
75	0,165	1257,6	225	0,130	4684,8
100	0,163	1578,7	300	0,128	5951
167	0,149	2484,4	400	0,122	7542,9
			500	0,128	8429,8
			630	0,127	9997,8
			750	0,121	11912
			800	0,119	12709,4
			1000	0,111	15900,7
			1250	0,111	18633,1
			1600	0,105	23867,3
			2000	0,1	29848,6

Tabla 1.2. (b) Medición de pérdidas en carga

MONOFASICOS			TRIFASICOS		
kVA	f.p. a corregir	var requeridos	kVA	f.p. a corregir	var requeridos
10	0,467	265,3	30	0,572	738,1
15	0,433	405,6	45	0,526	1148,2
25	0,387	691,7	75	0,415	2388
37,5	0,36	1049,6	112,5	0,391	3623,8
50	0,34	1410,6	150	0,327	5670,8
75	0,316	2135	225	0,321	8523,4
100	0,3	2861,8	300	0,272	12990,2
167	0,272	4836,1	400	0,263	17367,4
			500	0,231	24322,7
			630	0,227	30680,1
			750	0,223	36551,7
			800	0,223	38997,3
			1000	0,222	48752,3
			1250	0,18	73775
			1600	0,174	94536,3
			2000	0,17	118253,3

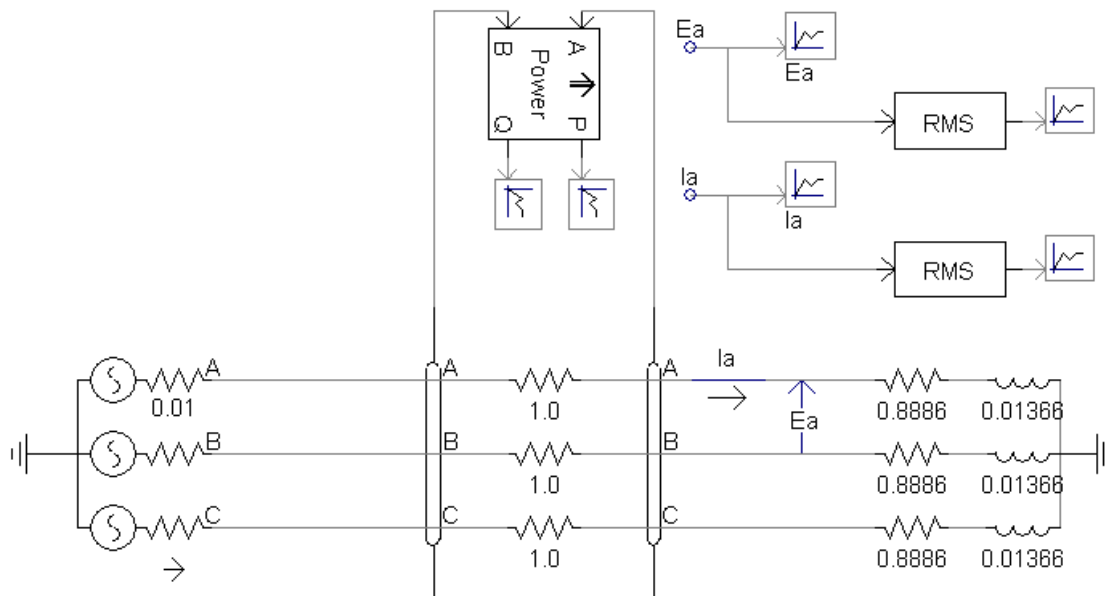


Figura 2.2 Modelo RL serie trifásico conectado en estrella para fines de compensación de reactivos que representa un transformador trifásico durante la medición de pérdidas de vacío ó carga (se registran potencia activa P, reactiva Q, corriente Ia y voltaje Ea)

En el presente trabajo de investigación se analizan los diferentes tipos de compensadores de reactivos, se escoge el de mayor aplicabilidad al sistema eléctrico compuesto por un transformador eléctrico sometido a los ensayos eléctricos de medición de pérdidas y de calentamiento y sobrecarga. Igualmente se estudian los diferentes tipos de control que podrían aplicarse al compensador seleccionado y mediante comparación de resultados de simulación de cada sistema de control se halla el de mejor desempeño para el caso compensado. Finalmente se verifican los resultados por montaje de un prototipo experimental.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma Técnica Colombiana NTC 380: 2001, Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades.
- [2] Norma Técnica Colombiana NTC 316: 1998, Transformadores. Método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos.
- [3] Norma Técnica Colombiana NTC 375: 2000, Transformadores. Medida de la resistencia de los devanados.
- [4] Norma Técnica Colombiana NTC 471: 1999, Transformadores. Relación de transformación, verificación de la polaridad y relación de fase.
- [5] Norma Técnica Colombiana NTC 837: 1997, Transformadores. Ensayo del dieléctrico..
- [6] Norma Técnica Colombiana NTC 1031: 1998, Transformadores. Determinación de pérdidas y corriente sin carga.
- [7] Máquinas Eléctricas. Stephen J. Chapman.

CAPITULO 3

EL COMPENSADOR DE VAR ESTATICO (SVC)

3.1. GENERALIDADES

Durante la operación diaria de un sistema eléctrico típico es usual que se presenten variaciones en el flujo de carga y en el fp; consecuencia de la conexión y desconexión de dicha carga. Situación que se acentúa cuando se presenta una exigencia alta de reactivos hacia los alimentadores ó desde ellos; y conlleva por su puesto a incrementos de temperatura e inestabilidad. Este fenómeno se puede eliminar considerando un sobredimensionamiento de las redes desde su diseño y construcción; ó mediante el empleo de dispositivos adicionales que sensen el sistema en todo momento y suministren la energía reactiva requerida en las cantidades y características adecuadas, de esta manera la red no es exigida más allá de su capacidad nominal [1].

Esta última solución se conoce con el nombre de “FACTS” (sistemas de transmisión flexible AC); y su tamaño y complejidad depende del tipo de carga y del usuario final. Estos dispositivos se agrupan en compensadores serie y en compensadores en derivación, siendo su finalidad [1],[2]:

- aumentar la capacidad de los alimentadores controlando sus límites térmicos,
- controlar los reactivos generados y absorbidos por la red,
- mejorar la estabilidad del sistema,
- mejorar el perfil de voltaje del sistema.

3.2. CLASIFICACION DE LOS FACTS

Cuando se selecciona un FACTS se estudia la rapidez de respuesta de acuerdo a la necesidad y naturaleza de la exigencia de reactivos; si es de régimen variable ó constante. En este último caso es más conveniente utilizar una compensación fija, un capacitor o un inductor únicos. De lo contrario se utilizan dispositivos de compensación que se comporten como fuente ó como carga de reactivos dependiendo de las condiciones en que se encuentre la red a compensar, a saber [3],[4]:

1. Compensador serie
2. Compensador en derivación ó shunt
3. Compensador de ángulo de fase

Los FACTS serie tienen su aplicación más directa conectados entre una línea y la carga ó entre dos sistemas interconectados; por ello son importantes en el control del flujo de potencia y como filtrado de armónicos en circulación por los alimentadores.

La figura 3.1 presenta TCSC (capacitor serie controlado por tiristor) con control discreto y con control continuo [1],[5].

Un FACTS en derivación ó SHUNT, también conocido como compensador de var estático SVC (Static Var Compensator). Y produce una reactancia equivalente, continuamente variable; la cual se obtiene mediante la variación en el ángulo de disparo de dos tiristores que alimentan el reactor o la capacitancia propia del compensador.

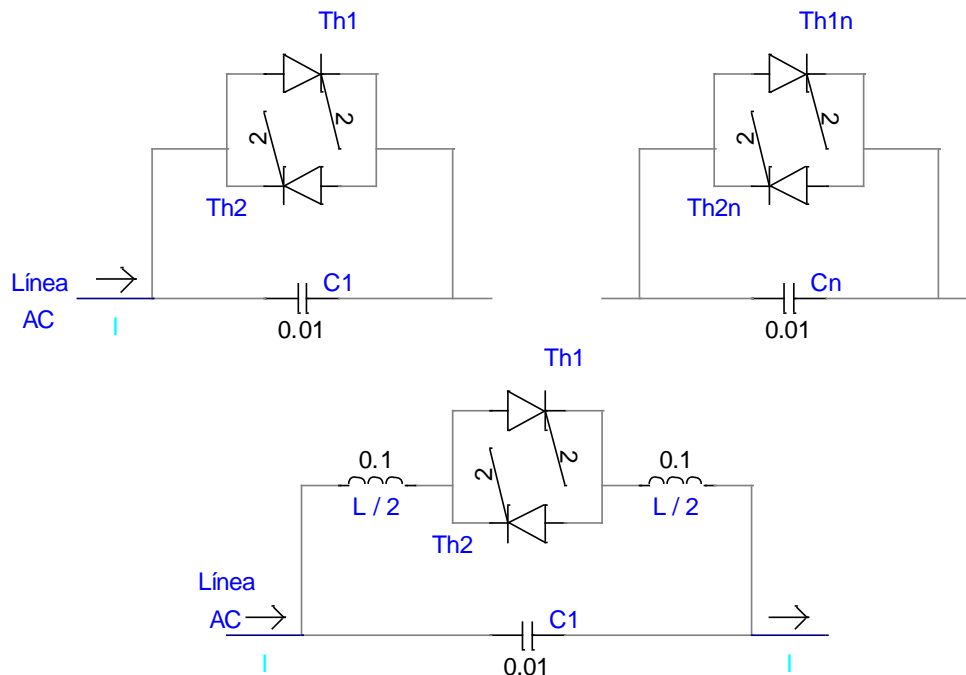


Figura 3.1 Capacitor serie controlado por tiristor TCSC [1],[5],[6],[9]

La figura 3.2 representa un RCT (inductor controlado por tiristor) y un CCT (capacitor controlado por tiristor). Estos FACTS solo permiten un tipo de compensación (inductiva ó capacitiva) por lo que su rango de aplicación es limitado y solo se utilizan si el tipo de carga no varía, donde actúan como controladores estáticos de voltaje.

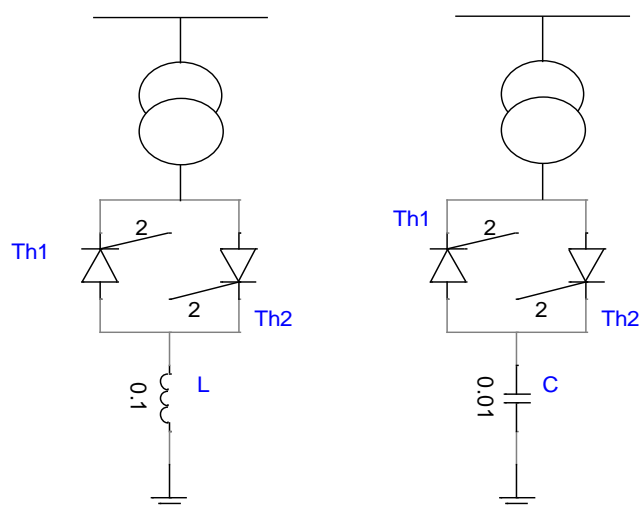


Figura 3.2 Compensador en derivación controlado por tiristor (TCR-TSC) [1],[5]

La figura 3.3 presenta un SVC más versátil; ya que tan solo el reactor es controlado continuamente y el banco de condensadores es fijo (aunque se puede conectar variable dependiendo de la complejidad del control deseado). De esta manera si el ángulo de disparo de los tiristores es bajo, la compensación será predominantemente inductiva; si por el contrario el ángulo de disparo es alto, la compensación será capacitiva. Como se observa si la tensión del sistema disminuye la corriente hace lo propio y viceversa; sea en régimen inductivo o capacitivo. Es también notable como el capacitor establece el rango de operabilidad del compensador; es decir, el SVC ejecuta la compensación dentro del límite que le permite el capacitor; por encima de los reactivos que produce el capacitor, el dispositivo no logrará compensar al sistema y viceversa [6].

El condensador inyecta potencia reactiva de manera constante y por más tiempo no requiere un control complejo, por ello puede realizarse por medio de un interruptor mecánico o electrónico (el interruptor se abre o cierra un número de semiciclos entero);

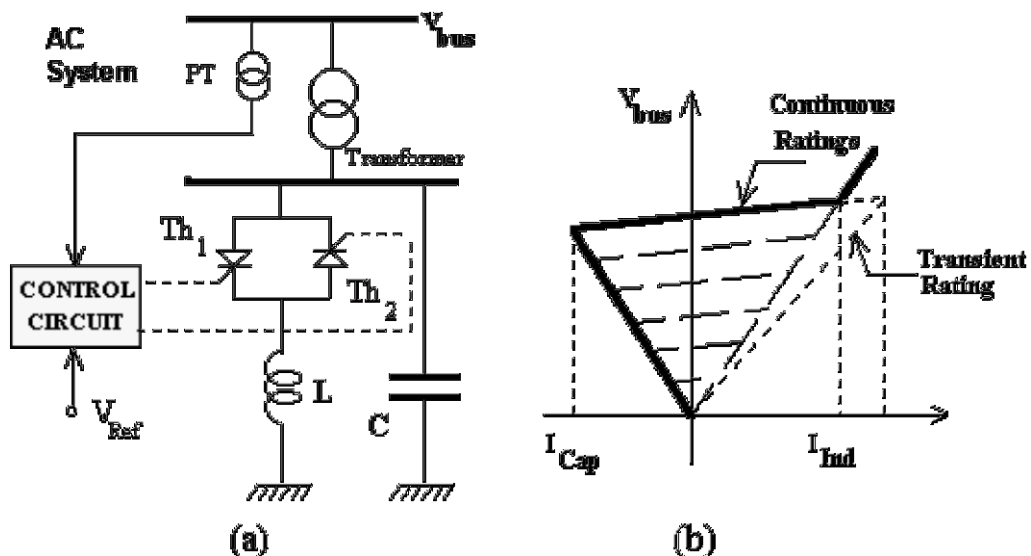


Figura 3.3 (a) Esquema básico SVC en compensación continua, (b) característica V vs. I

lo que se conoce como compensación discreta. Por esta razón se puede decir, que el SVC tiene compensación continua y compensación discreta simultáneamente [5].

Los FACTS de ángulo de fase son empleados comúnmente en grandes sistemas de potencia y distribución, donde actúan con una amplitud de voltaje insertada en serie, que varía a través de un control de fase mediante el disparo de los tiristores.

3.3. SELECCIÓN DEL SVC

Retomando el objeto del presente estudio, se pretende corregir el bajo factor de potencia que presenta un transformador eléctrico durante la realización de las pruebas de medición de pérdidas y la prueba de calentamiento y sobrecarga a transformadores eléctricos de distribución. Analizando el circuito equivalente RL de la carga (figura 2.2 en el capítulo dos); se observa que el compensador de mejor aplicabilidad en este caso es el SVC con inductancia en compensación continua y condensador en compensación discreta (figura 3.3). De esta manera si se llegan a utilizar varias capacitancias; se podrá por cada nivel de vares generados tener un rango de operación y corregir el factor de potencia de los alimentadores; cubriendo así, una amplia gama de potencias [6].

En cuanto a la etapa de control del SVC se puede realizar por medio de diferentes técnicas de control; tales como: control clásico, control difuso, control neurodifuso y neurodifuso con parámetros entrenados por medio de algoritmos genéticos [7], [8].

3.4. FUNCIONAMIENTO DEL SVC

Por definición se trata de un sistema de compensación basado en el control de tiristores [9] (como el mostrado en la figura 3.3), cuya operación se alterna entre dos estados: bloqueo ó conducción.

Durante el estado bloqueado, la corriente entre los terminales (ánodo) A y (cátodo) K del tiristor es nula; lo cual ocurre por que la tensión entre A y K es negativa ó positiva, pero no hay inyección de corriente por la (puerta) G ó es negativa. Por el contrario durante el estado de conducción circula corriente entre ánodo y cátodo; lo cual se logra cuando la tensión entre A y K es mayor a la tensión de umbral (voltaje de la juntura del tiristor) y cuando existe pulso positivo de corriente por la puerta G.

Si se le envía una corriente positiva por G, al tiristor Th_1 en el momento en que la tensión $V_{AK\ Th1} > V_{umbral}$, circulará $i_{AK1} > 0$, hacia el inductor L. Dependiendo del instante de tiempo en el que se inyecte corriente a Th_1 , el inductor recibirá más o menos corriente y el compensador podrá generar más o menos reactivos hacia la red.

De igual forma si se le envía una corriente positiva por G, al tiristor Th_2 en el momento en que el voltaje $V_{AK\ Th2} > V_{umbral}$ circulará $i_{AK2} > 0$, desde el inductor L. Dependiendo del instante de tiempo en el que se inyecte corriente a Th_2 , el inductor entregará más o menos corriente y el compensador podrá suministrar más o menos reactivos hacia la red.

Los tiristores Th_1 y Th_2 conectados en contrafase ó antiparalelo operan de manera sincronizada, el primero durante el semiciclo positivo de la onda de voltaje y el segundo durante el semiciclo negativo. Los disparos de corriente por la compuerta G deben ser

positivos y aparecer con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la onda de tensión de la red; el tiristor cuyo $V_{AK} > V_{umbral}$ estará habilitado para conducir; mientras que el otro esperará un semiciclo su turno para estar habilitado a conducir.

De otro lado el capacitor C se puede conectar al compensador directamente o por intermedio de un contactor, ya que la respuesta de reactivos total del conjunto será regulada a través del tiempo de conducción de los tiristores Th_1 y Th_2 ; esto quiere decir, que la responsabilidad plena del buen comportamiento del compensador recae en el desempeño del circuito de control [9].

3.5. CIRCUITO DE CONTROL

Es notable, la importancia del circuito de control y la estrategia implementada en él; de tal manera que se garantice una alta efectividad, representada en: mayor eficiencia (alta optimización de los recursos disponibles), más eficacia (agilidad para alcanzar la estabilidad del sistema con ó sin compensación); mediante la comparación de la ejecución de cada estrategia se establece cual es la mejor de las técnicas a utilizar.

3.5.1. Control clásico:

Toma la salida de la planta y compara con la respuesta deseada ($u(t)$); la desviación es afectada simultáneamente por un factor proporcional y por un proceso de integración; ambos resultados se suman y retornan a la planta como acción de control (ver fig. 3.4).

En cada instante de tiempo la señal de control BSVS (susceptancia fija [1]), es el área bajo la curva de la señal del error actuante hasta ese momento más el error proporcional (ver figura 3.5). Es decir, se combinan las características del control proporcional y el

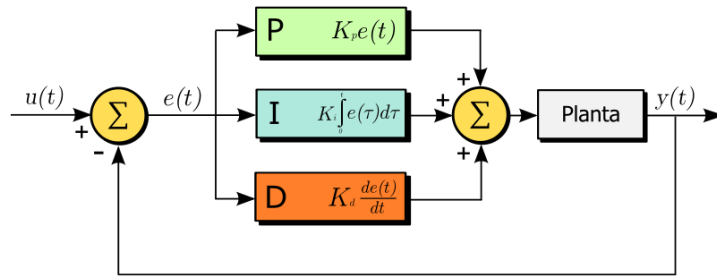


Figura 3.4 (a) Esquema básico control PI

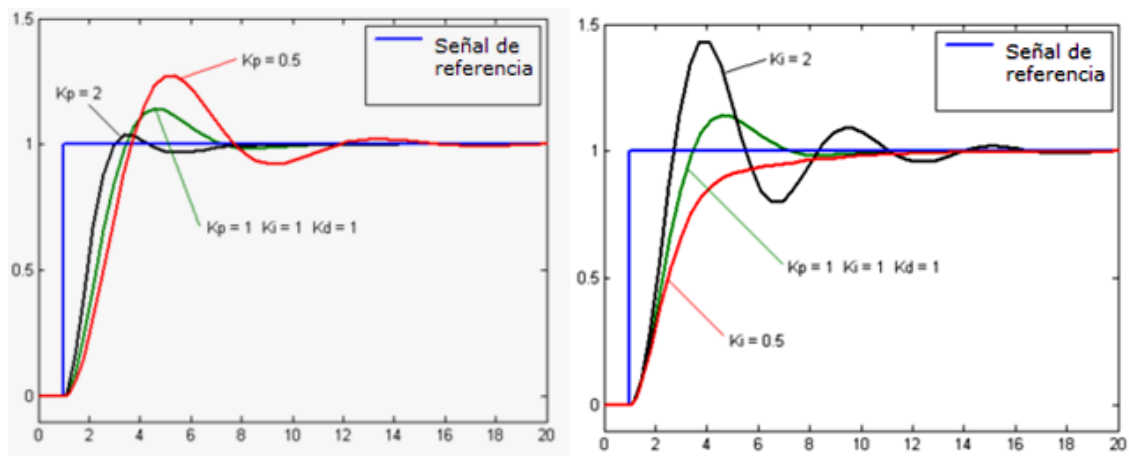


Figura 3.4. (b) señal de salida con dos diferentes factores de ajuste
control proporcional P (izquierda), control integral I (derecha).

control integral; con lo que se elimina el efecto del error de régimen permanente (típico del manejo proporcional) y se disminuyen las oscilaciones amortiguadas en la respuesta ayudando a corregir más rápidamente el error. La estabilidad del arreglo PI es mayor que la estabilidad de la acción proporcional ó de la acción integral independientes; siempre y cuando se ajusten la *ganancia proporcional*, la *constante de tiempo de integración* y sus límites. Dichas magnitudes normalmente se definen por métodos empíricos (experiencia) ó estadísticos (basado en ensayos de prueba y error). A manera de ejemplo, si se emplea un valor alto como constante de tiempo de integración la respuesta del controlador se hace más lenta presentando oscilaciones de baja frecuencia

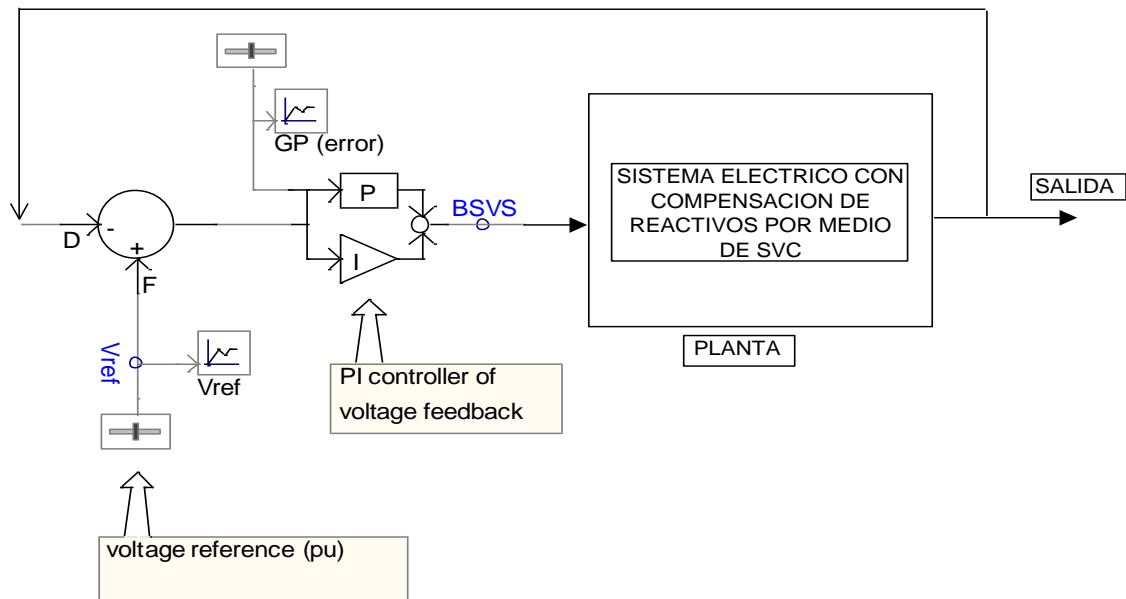


Figura 3.5 Control proporcional integrativo PI (ambiente PSCAD)

enmarcadas en un error de estado estacionario directamente dependiente del valor de la ganancia proporcional [8].

3.5.2. Control difuso:

Toma la salida de la planta y compara con la respuesta deseada ($u(t)$); la desviación es sometida a un fuzificador (que transforma señales numéricas en señales difusas) y luego se procesa a través del conjunto de reglas tipo IF-THEN (base de conocimiento); para ser posteriormente transformada al mundo real a través de un defuzificador (transforma señales difusas en numéricas) y entrega la salida de la acción de control a la entrada de la planta objetivo. La fig.3.6 detalla el esquema de control difuso y el conjunto de reglas, que conforman un defuzificador con inferencia de máximos y mínimos [8]. La

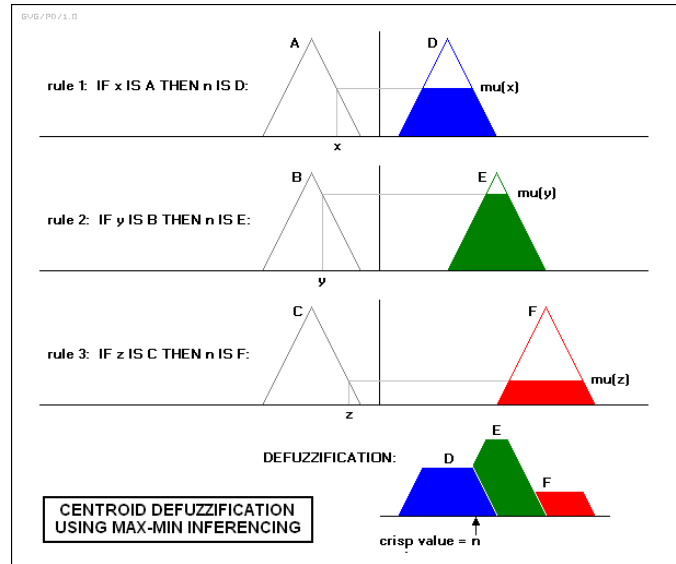
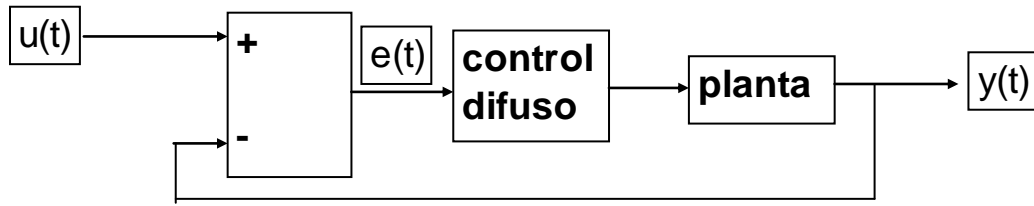


Figura 3.6 Esquema control difuso y conjunto de reglas (que conforman un defuzificador con inferencia de máximos y mínimos)

lógica difusa a través de reglas de activación probabilísticas (heurísticas) produce una salida del sistema que se ajusta a las entradas del mismo.

En la figura 3.7 la constante K_u actúa conformando la interfase de defuzificación de la acción de control y las constantes K_e y K_{de} son las interfases de fuzificación de las entradas e y de respectivamente (error y derivada del error) escalando las variables a terminología lingüística. Bajo el icono del control difuso se encuentran concebidas las etapas de base de conocimiento ó conjunto de reglas (conjuga las precisiones del control que realizaría un experto por medio de un conjunto de reglas lingüísticas); y la etapa de lógica de decisión que simula criterios de conceptos difusos infiriendo las acciones de

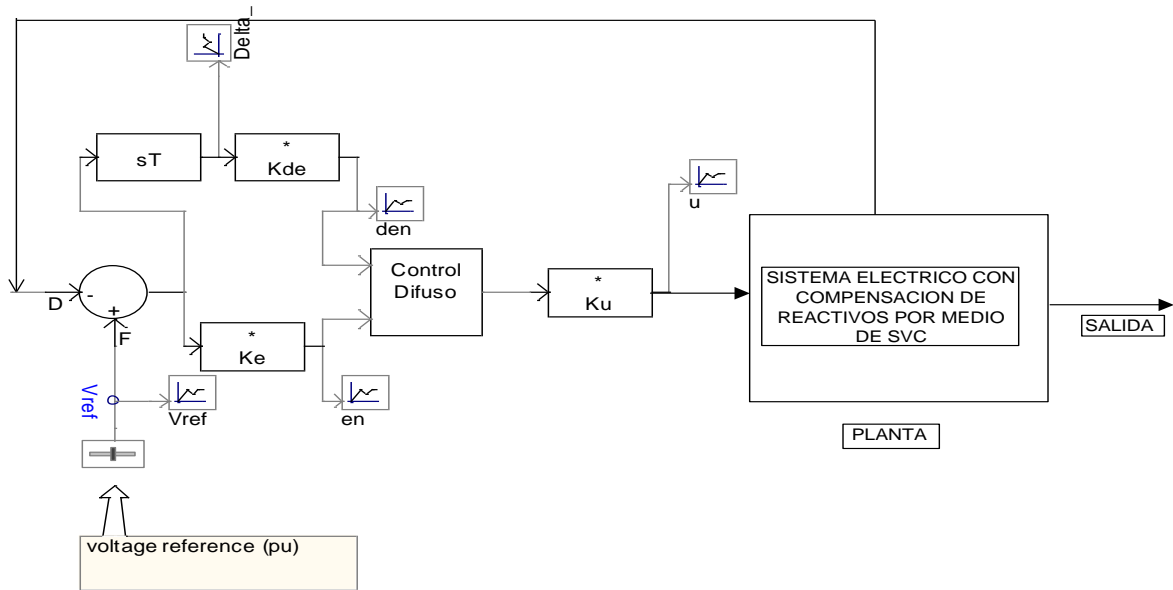


Figura 3.7 Esquema de control difuso aplicado al proyecto (ambiente PSCAD)

control difusas y emplea implicaciones y reglas de inferencia de lógica difusa.

En la teoría de control moderno uno de los controles más empleados es el PID, que requiere para su implementación del conocimiento del modelo matemático del sistema ó en caso contrario de la información estadística de las salidas y entradas de la planta para ajustar los parámetros del controlador [8],[9].

Es aquí donde se evidencia una primera ventaja al usar control difuso, pues no precisa del conocimiento del modelo matemático de la planta; y se basa en la buena experiencia del operador y un conjunto de observaciones y ajustes más sencillos.

3.5.3. Control neurodifuso:

Integrar el control difuso con un sistema de redes neuronales amplía su capacidad de aprendizaje y facilidad de adaptación ante cambios en el modelo de la planta (ver figura 3.8). Este tipo de control está concebido para solucionar problemas complejos donde los

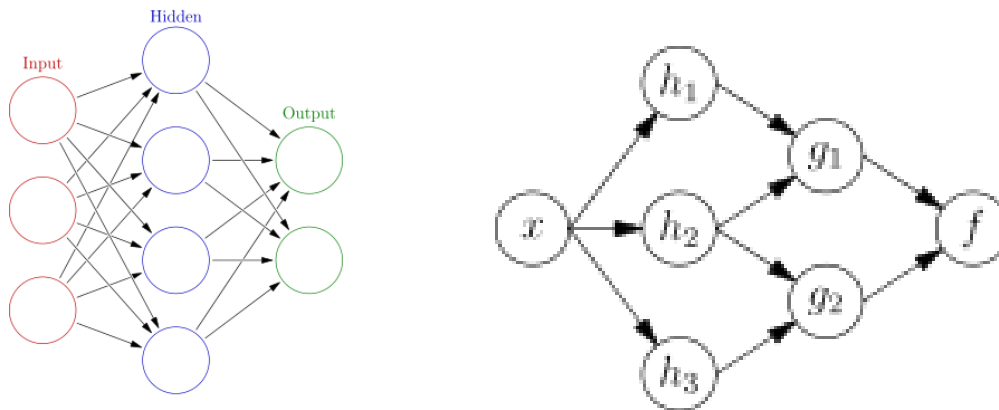


Figura 3.8 Red neuronal artificial ANN (grupo de neuronas e interconexiones (izquierda)). Pesos de interconexiones y funciones de activación o salida (derecha).

datos de entrada aparecen con alta dispersión (problemas de programación no lineal, donde el modelamiento matemático se convierte en una difícil tarea). En este contexto el uso de las redes neuronales permite crear estrategias de entrenamiento donde el sistema active la respuesta correcta y así estar en condiciones de brindar un control inteligente al sistema.

En un sistema de control mediante redes neuronales es imposible interpretar el resultado en términos del lenguaje natural, de ahí que la unión entre estas dos técnicas de control neuronal y difuso, dan como resultado modelos más fáciles de interpretar e implementar. En la figura 3.9 se muestra un modelo neurodifuso, en el cual tres reglas de inferencia funcionan como una capa de la red [10].

En las redes neuronales, las funciones de activación de la neurona vienen siendo las funciones de membresía en el control difuso, la parte de la capa oculta de la red neuronal, vienen siendo las reglas en la lógica difusa, las salidas corresponden a la suma de los pesos en la red neuronal, mientras que en el control difuso a este proceso se le

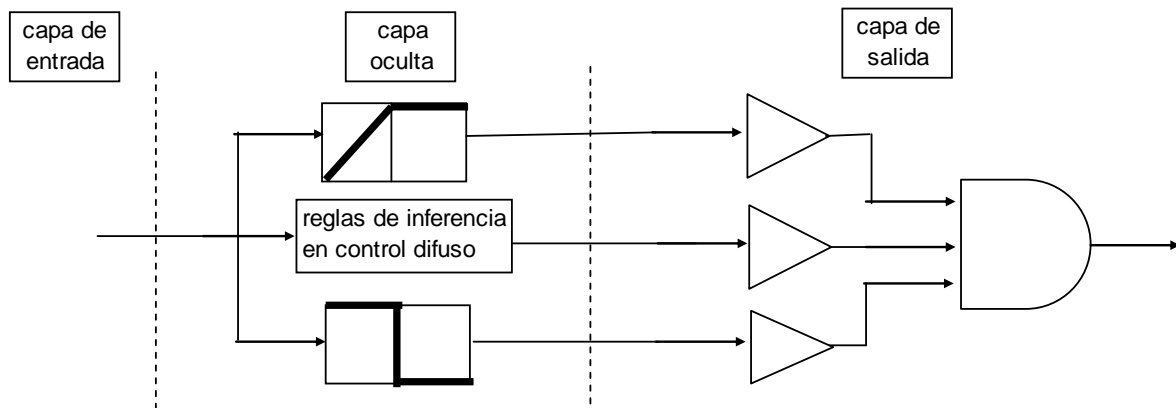


Figura 3.9 Tres reglas de inferencia percibidas como red neuronal

conoce como centro de gravedad o defusificación (ver fig.3.10 Red ANFIS) [7],[9],[12].

Mientras las redes neuronales son buenas reconociendo patrones, no son tan buenas si se trata de explicar como alcanzar sus decisiones [11],[12]. Ahora bien, los sistemas difusos si pueden razonar con información imprecisa y son buenos explicando sus decisiones, pero no pueden automáticamente adquirir las reglas que utilizan para tomar dichas decisiones. Una forma de superar las limitaciones individuales de cada tipo de control es mediante un sistema híbrido inteligente, que combina dos o más técnicas (por ejemplo neuronal y difuso).

La lógica difusa provee un mecanismo de inferencia que tiene un conocimiento impreciso de la planta y la red neuronal artificial ofrece aprendizaje, adaptación, baja tolerancia y generalización. Es así, como la red neuronal es usada para sintonizar las funciones de membresía del sistema difuso que realiza la toma de decisiones, configurando finalmente el control híbrido de la planta [13] (ver figura 3.11)

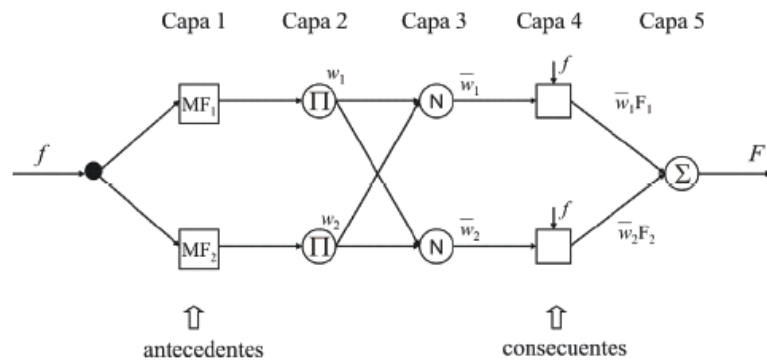


Figura 3.10 Arquitectura ANFIS (red adaptativa basada en sistema de inferencia difuso)

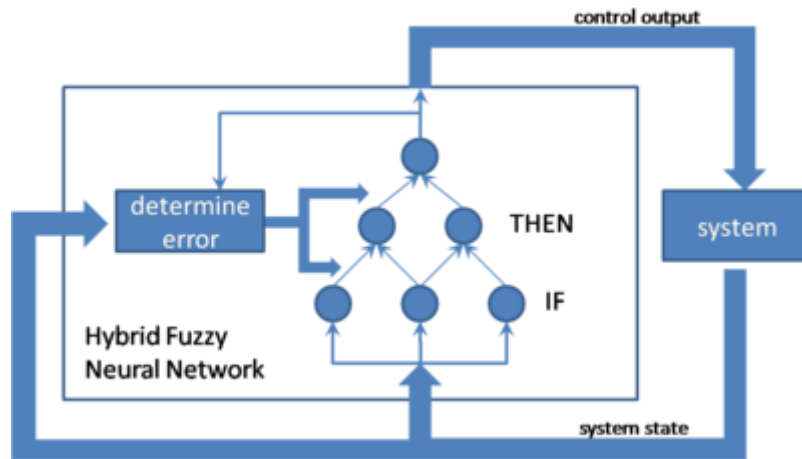


Figura 3.11 Red neuronal híbrida difusa.

La red híbrida neuronal no puede usar directamente el algoritmo de retroalimentación del error (backpropagation) para aprendizaje. En su lugar utiliza el método de gradiente descendente para aprendizaje de los consecuentes y de los parámetros de las funciones de membresía que representan los términos lingüísticos en las reglas [12].

En la figura 3.12 se aprecia el control neurodifuso en un diagrama de bloques general, destacándose la interfase de fuzificación conformada por las constantes K_e y K_{de} . Una vez estas señales ingresan al controlador, es la red neuronal quien se encarga de realizar

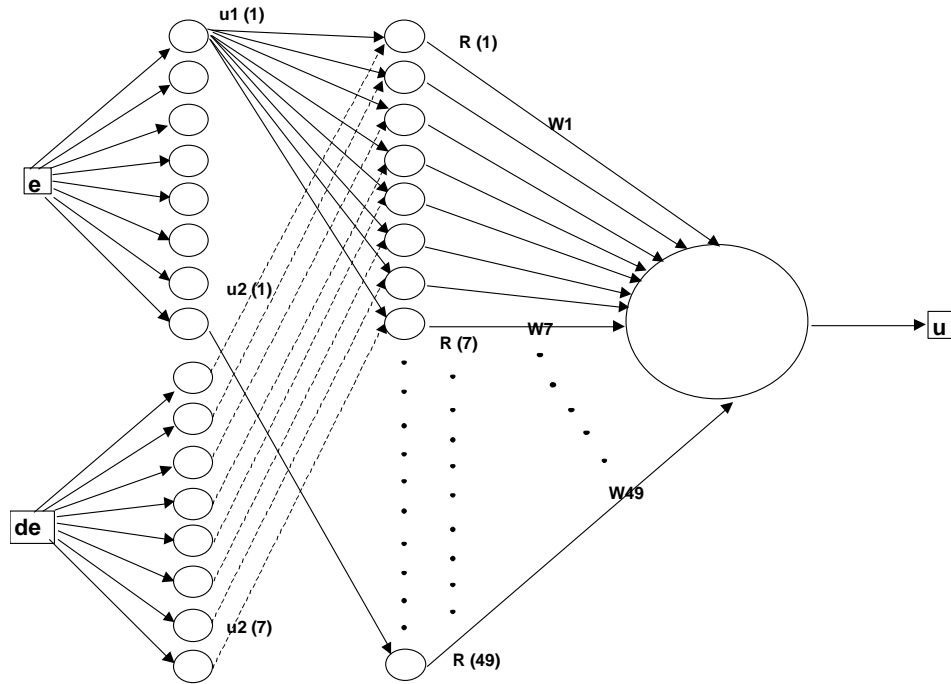


Figura 3.12 (a) Control neurodifuso ambiente PSCAD

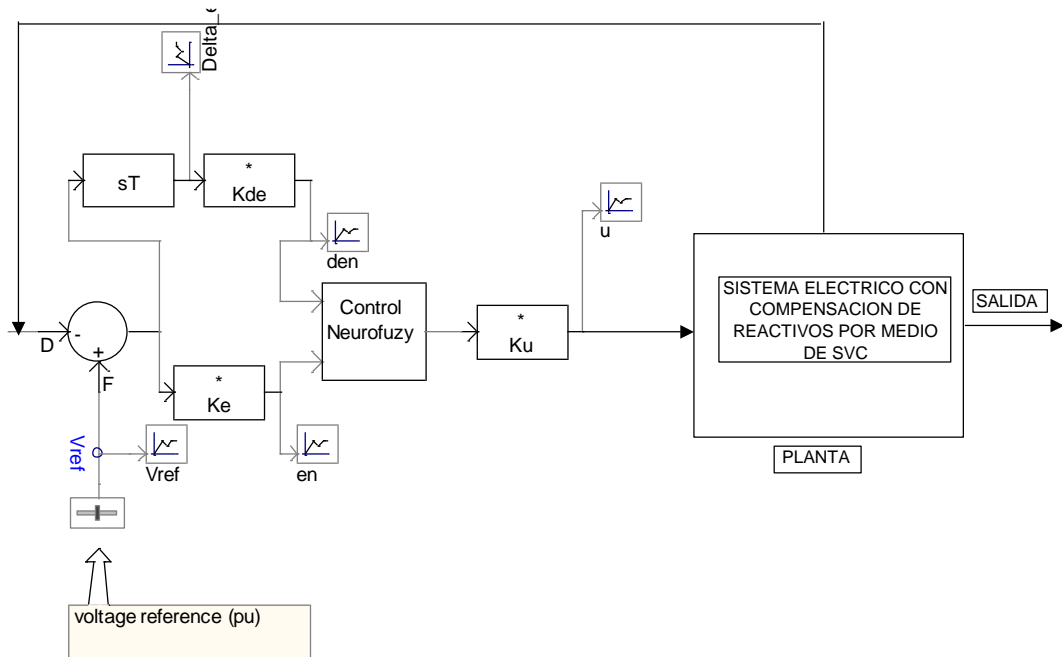


Figura 3.12 (b) Red neuronal híbrida

las operaciones matemáticas a través de las conexiones apropiadas y generar la salida con el mínimo error; sea cual sea el punto de operación de la máquina controlada.

Finalmente la salida u llega a la fase de defuzificación (constante K_u) que alimenta la planta objetivo.

La clave del buen desempeño del proceso es realizar un buen entrenamiento de la red neuronal (determinación de los parámetros de la red), que se desarrolla en el presente estudio en el modo off-line; por medio de gradiente descendente con momento buscando siempre la reducción de la señal de error que se propaga a través de la red, y se obtiene a la salida del sistema.

3.5.4. Control neurodifuso con parámetros entrenados por algoritmos genéticos :

El control de la planta es realizado por medio de un sistema de inferencia difusa que alimenta una red adaptativa (red neuronal con aprendizaje supervisado). Dicho aprendizaje supervisado consta de dos partes :

entrenamiento por algoritmos genéticos para optimizar los antecedentes

entrenamiento por mínimos cuadrados para optimizar los consecuentes

De acuerdo al funcionamiento de los métodos de actualización de parámetros de las redes adaptativas, se pueden encontrar desventajas por la lentitud y posibilidad de encontrar mínimos locales que atrofien el mejor desempeño de la red [12],[13]. Sin embargo, por medio de la selección natural de los mejores individuos de una población en virtud de su desempeño; los algoritmos genéticos le dan la eficacia a la búsqueda del mínimo error que asegura un mejor aprendizaje de la red neuronal [7].

Los algoritmos genéticos le quitan gran parte de la incertidumbre al proceso de aprendizaje y además agilizan el ciclo de entrenamiento. El controlador ya entrenado

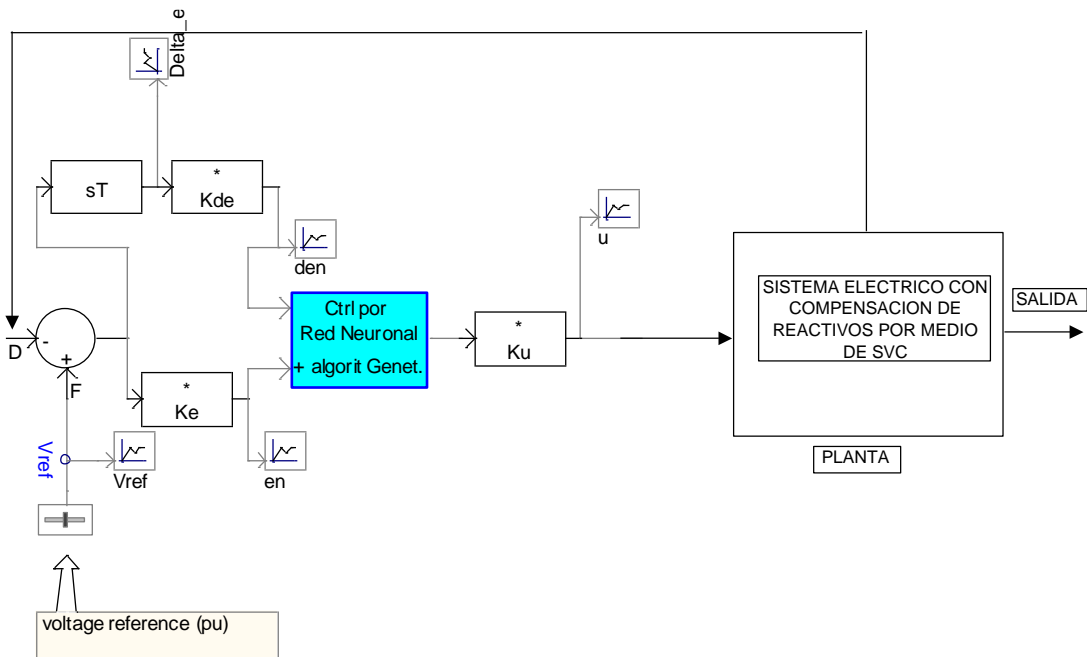


Figura 3.13 Control neurodifuso y parámetros entrenados por algoritmos genéticos

debe desempeñarse generando los mismos ó mejores resultados que los producidos por el control neurodifuso analizado en la sección 3.5.3. Ver figura 3.13 control neurodifuso con parámetros entrenados por algoritmos genéticos [7] (ambiente PSCAD [15]).

3.6 APLICACIÓN DEL SVC

Para darle aplicabilidad a todos los esquemas de control presentados se simulan los diferentes tipos de control aplicados a un SVC compensando el circuito equivalente de un transformador eléctrico durante las pruebas de medición de pérdidas y en la prueba de calentamiento y sobrecarga mencionadas en el capítulo uno. Dicho circuito equivalente constituido por una rama RL serie.

Para estudiar cada algoritmo y entrenar las redes neuronales se usa el Matlab [14]. Los resultados de los entrenamientos producen los parámetros utilizados en el PSCAD, que a su vez permiten simular el sistema eléctrico completo compensado por un SVC y

controlado por alguna de las diferentes estrategias de control planteadas en este capítulo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] K.R. Padivar. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution.
- [2] Faustino de la Bodega, Maria Dolores Gutiérrez, Zaloa Aginako, Koldobika J. Sagastabeitia. FACTS Formas de usar más eficientemente las líneas eléctricas existentes. Departamento de ingeniería eléctrica. E.U.I.T.I. de Bilbao (EHU/UPV).
- [3] R. Mohan Mathur. Rajiv K. Varma. Thyristor-Based Facts Controllers for Electrical Transmission Systems, 2002,
- [4] Coronel-Mercado Luis Enrique, Rodríguez-Rivas Jaime José, Huerta-González Pedro Francisco. Simulación del compensador estático de VAR de la subestación Culiacán Tres para el análisis de transitorios. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, Volumen XIV (número 3), julio-septiembre 2013: FI-UNAM.
- [5] Edson H. Watanabe, Pedro G. Barbosa, Katia C. Almeida, Glauco N. Taranto. Tecnología FACTS – Tutorial. SBA Controle & Automacao Vol. 9 no.1 / Jan., Fev., Mar. e Abril de 1998.
- [6] MUHAMMAD H. Rasid, Virgilio González y Pozo Agustín Suárez Hernández Electrónica de potencia : circuitos, dispositivos y aplicaciones. .
- [7] Oscar Cordon, Francisco Herrera and Pedro. Generating the Knowlegde Base of a Fuzzy Rule-Based System by the Genetic Learning of the Data Base, Villar, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.9 No.4 , August 2001 IEEE.

- [8] Alfonso Alzate, Jhon Asdrúbal Herrera, Omar E. Castro. Efecto de un Compensador de Var Estático en el Amortiguamiento de las Oscilaciones. Revista Scientia Et Technica N°21 Julio/2003/2.
- [9] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Prentice-Hall. 1999.
- [10] Investigación Sistema de control inteligente neurodifuso (neurofuzzy). Universidad de Hermosillo. 2007
- [11] Agustin Gajate, Pastora Vega, Rodolfo Haber. Modelado y control neuro-difuso de procesos de taladrado de alto rendimiento. XV Congreso Español sobre tecnologías y lógica Fuzzy. Huelva, 3 a 5 de febrero de 2010.
- [12] Robert Fullér. Neuro-Fuzzy Methods for Modelling Fault Diagnosis. Eötvös Loránd University, Lisbon. August 31 and September 1, 2001.
- [13] Alfonso Alzate Gómez, David Mancera. Aplicación del control difuso en un Statcom. Scientia et Technica Año XIII, No.34, Univ. Tecnológica de Pereira. Mayo de 2007.
- [14] Matlab. The language of Technical computing
- [15] Manitova HVDC Research. Pscad/EMTDC User's Guide. 1998.

CAPITULO 4

ESTRATEGÍAS DE CONTROL APLICADAS AL SVC

4.1. GENERALIDADES

En este capítulo se analizan una serie de estrategias de control de diferente índole, (algoritmos neurodifusos, controles difusos, controladores PI y controles neurodifusos entrenados por algoritmos genéticos) como herramientas para control eficaz de un SVC (figura 4.1).

A manera de complemento se presentan comparaciones de desempeño de dichas estrategias determinando así; la estrategia de control de mayor aceptación. Como criterio de comparación permanecen constantes la topología del SVC en su circuito de potencia y en el esquema general de control. Adicionalmente los valores de los elementos circuitales externos a cada estrategia de control permanecen inalterados en cada caso, para establecer así; un marco de referencia. Únicamente se varían las ganancias de las variables de control e , de y u en las estrategias de control que así lo permitan.

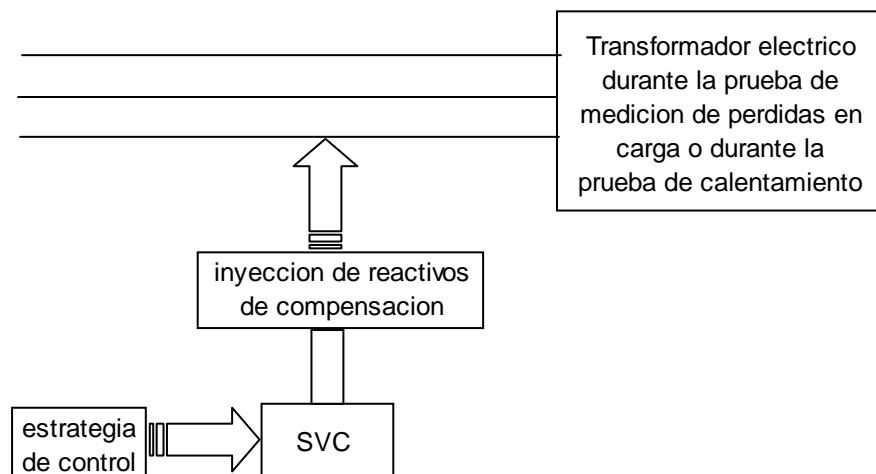


Figura 4.1. Diagrama general del SVC.

4.2. ESTRATEGIAS DE CONTROL NEURODIFUSO CON ENTRENAMIENTO PREVIO DE LOS PARAMETROS DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA

Como se mencionó en el capítulo tres la red neuronal adaptiva basada en un sistema de inferencia difuso permite entrenar las funciones de membresía por gradiente descendente (sección 3.5.3 control neurodifuso).

Para la implementación del controlador difuso es necesario determinar las funciones de membresía que representan los términos lingüísticos de las reglas de inferencia [1]. La efectividad del modelo difuso de representar la no linealidad entre la salida y la entrada, dependerá de la partición difusa de los datos de entrada. Por este motivo la sintonización de las funciones de membresía es un importante tema en el control difuso. A continuación se presentan dos diferentes tipos de estrategias de sintonización de las funciones de membresía.

4.2.1. ESTRATEGIA DE CONTROL NEURODIFUSO BASADA EN EL ALGORITMO DE Chao et al

Una de las estrategias aplicadas fue un algoritmo de control basado en el esquema de Chao Et Al [2], que entrena los parámetros de las funciones de pertenencia y el centro de la función de pertenencia de salida usando gradiente descendente con momento, la partición difusa consta de 49 reglas. Este algoritmo propone un buen rendimiento con un numero de reglas difusas y parámetros ajustables (ver figura 4.2).

4.2.1.1. CONSTITUCION BASICA

Los parámetros de las funciones de membresía de cada entrada (anchos y centros), y los pesos w_i de los axones en la tercera capa son entrenados con anterioridad usando

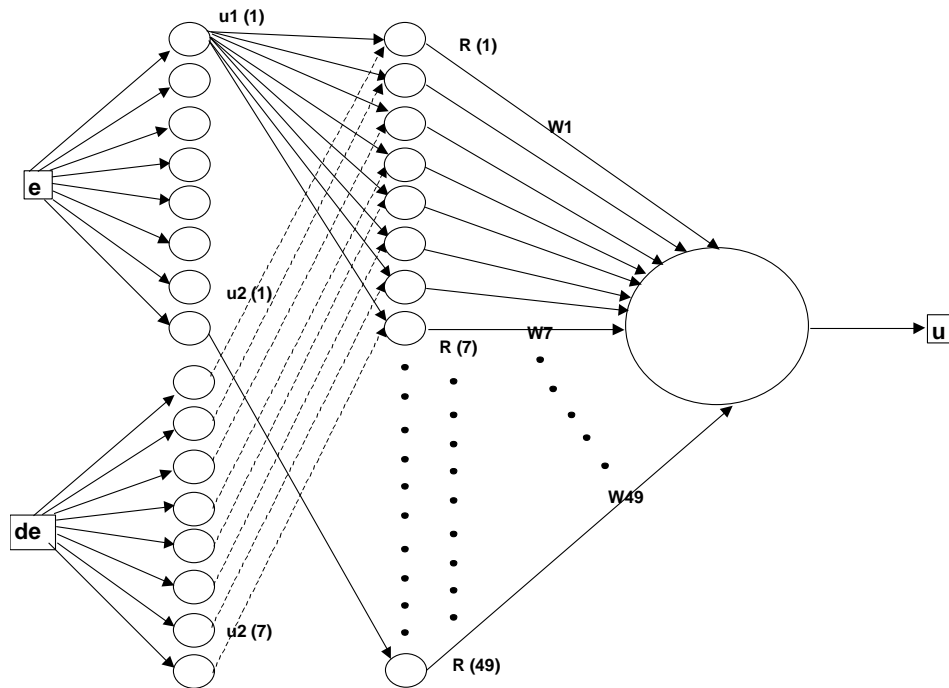


Figura 4.2 Esquema red neuronal adaptativa cuatro capas basada en algoritmo Chao et al.

gradiente descendente con momento, siendo el punto de partida una asignación inicial de parámetros y pesos. Posteriormente opera el controlador neuro-difuso, que permite el flujo de información a lo largo de la red neuronal constituida.

Una representación esquemática del control basado en el algoritmo Chao et al, se observa en la figura 4.3. Es de resaltar la alta incidencia de las ganancias (kde, ke, kmu) que actúan sobre las variables de entrada (e, de) y salida u ; en la respuesta del SVC.

La respuesta observada en la figura 4.4 es muy satisfactoria con un perfil de voltaje de salida que no revela muchas variaciones; y unas señales de control (ángulo alfa y rama capacitiva) bastante estables y en algunos casos nulas.

del SVC; siendo lo más aconsejable emplear valores de ganancia bajos sobretodo en la ganancia de la variable de salida u (ku).

4.2.2. ESTRATEGIA DE CONTROL NEURODIFUSO BASADA EN EL ALGORITMO DE Li-Xi Wang

El método de generación de reglas de Wang y Mendel [3],[4] produce el menor error medio cuadrático sobre cada proceso de entrenamiento considerando intervalos de tres a nueve posibles valores para el número de etiquetas, donde todas las variables tienen la misma granularidad y particiones difusas no uniformes.

Granularidad : número de etiquetas para cada variable del problema.

4.2.2.1. CONSTITUCION BASICA

El esquema básico de la red neuronal de cuatro capas para este algoritmo es el mismo presentado en la figura 4.2. Su esquema de control correspondiente se observa en la figura 4.5. En el esquema de control propuesto la señal de salida del control u , no se ve tan afectada por el comportamiento de las ganancias de las variables e , de y u .

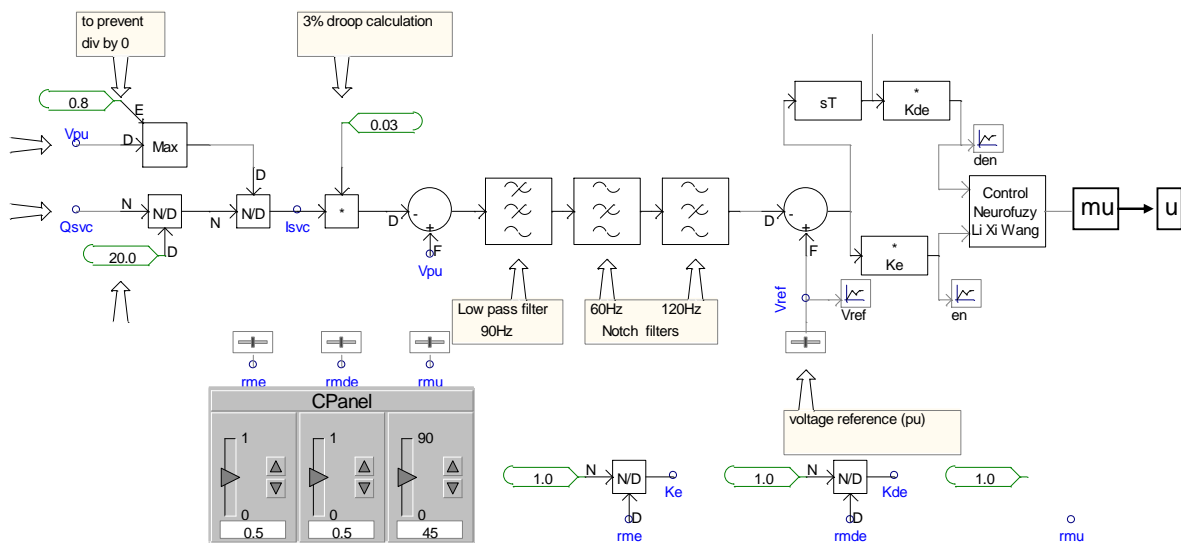


Figura 4.5 Esquema básico control neurodifuso algoritmo Li Xi Wang (PSCAD)

La figura 4.6 presenta respuestas satisfactorias al proceso, aunque con un porcentaje de rizado en el voltaje de salida (contenido de armónicos no nulo). Sin embargo, se observan señales de control del ángulo de disparo alfa y rama capacitiva de compensación muy estables (con baja o ninguna variación); con alta inmunidad a los cambios en las ganancias de las variables e , de y u .

4.3. ESTRATEGIAS DE CONTROL DIFUSO

En materia de control difuso se simularon tres propuestas:

- control difuso de 9 reglas
- control difuso de 49 reglas
- control difuso de 9 reglas (base control clásico PI)

de manera general cada propuesta consta de unas entradas: señal e (error) y de (derivada del error), que son normalizadas y posteriormente descompuestas en términos difusos

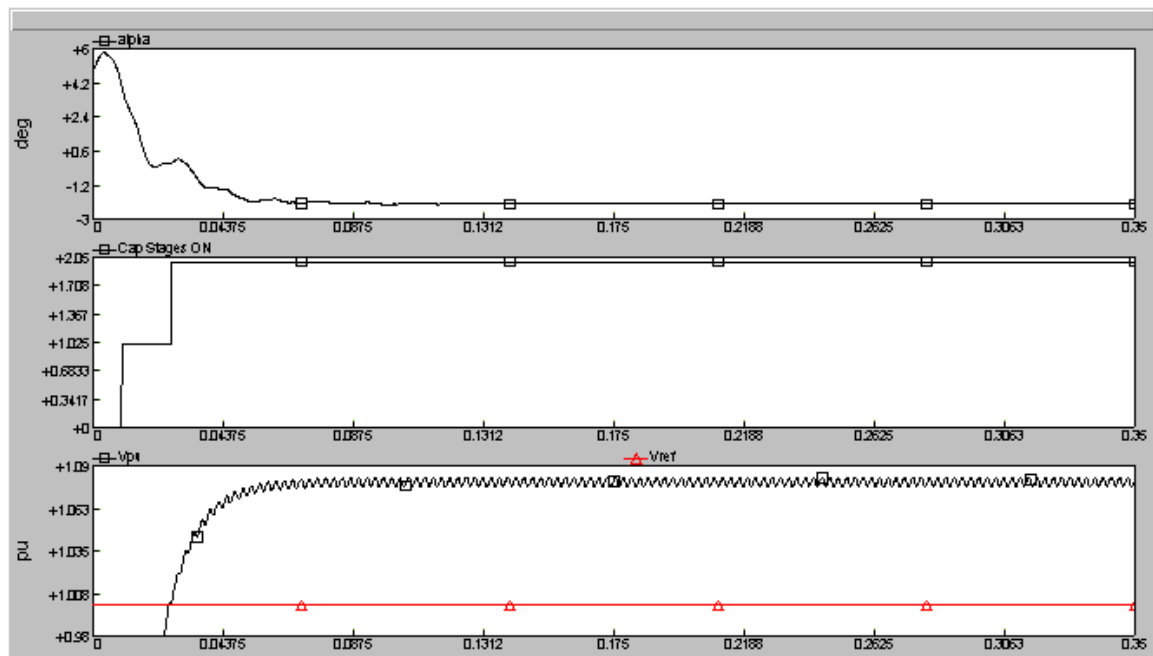


Figura 4.6 Respuestas esquema de control neurodifuso Li Xi Wang

por medio de funciones de membresía de tipo triangular. Luego se utiliza un mecanismo de inferencia (tipo Mandani) que determina la variable de disparo activa en cada instante de tiempo y de acuerdo a este valor se selecciona la salida correspondiente. Es aquí donde la base de reglas difusas establece la diferencia fundamental entre una y otra alternativa de control. Finalmente un método de defuzificación entrega el centro de gravedad ó salida del controlador u permitiendo de esta forma la satisfactoria operación del algoritmo. Para cada estrategia de control existe una base de conocimiento diferente algunas veces en tamaño y otras por el tipo de datos almacenados.

4.3.1. CONTROL DIFUSO CON NUEVE REGLAS

La base de conocimiento se presenta en la tabla 2 y la figura 4.7 contiene el esquema de control difuso nueve reglas. Inicialmente se prueba el algoritmo de control alimentándolo con valores de prueba y los resultados gráficos del control se detallan en la figura 4.8; comprobándose el buen desempeño, ya que la respuesta u es de carácter confiable en un rango acotado reducido.

Tabla 2. Base de conocimiento control difuso nueve reglas

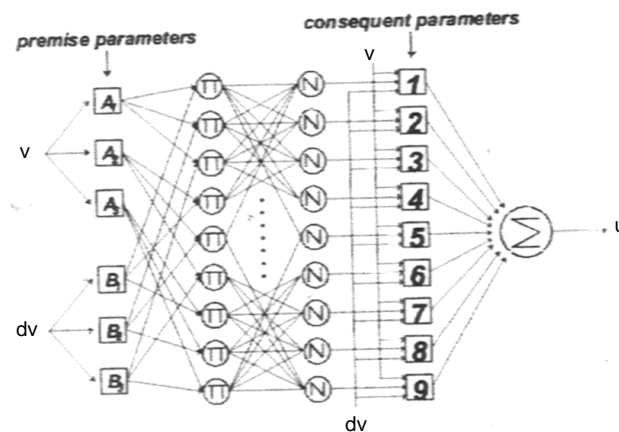
$$R = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & 0.6 & -0.3 & -0.3 \\ \hline & 0.6 & 0 & -0.3 \\ \hline & 0.6 & 0.6 & -0.3 \\ \hline \end{array}$$


Figura 4.7 Esquema control difuso nueve reglas

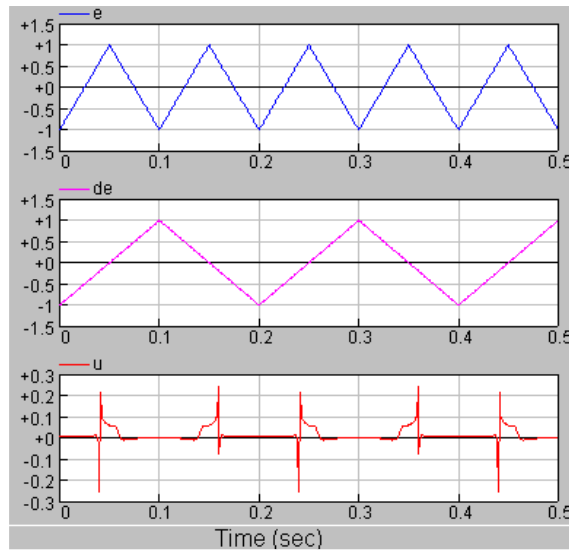


Figura 4.8 Respuesta del control difuso nueve reglas operando con entradas de prueba.

4.3.1.2. COMPORTAMIENTO DEL CONTROLADOR

Una vez se acopla el control al SVC; se obtienen variaciones en el ángulo alfa bastante notables, ocasionadas por una alta inestabilidad de la señal de salida u , cuando hay exigencias de reactivos de compensación; en contraste con la rama capacitiva que se comporta más estable. (Ver figura 4.9).

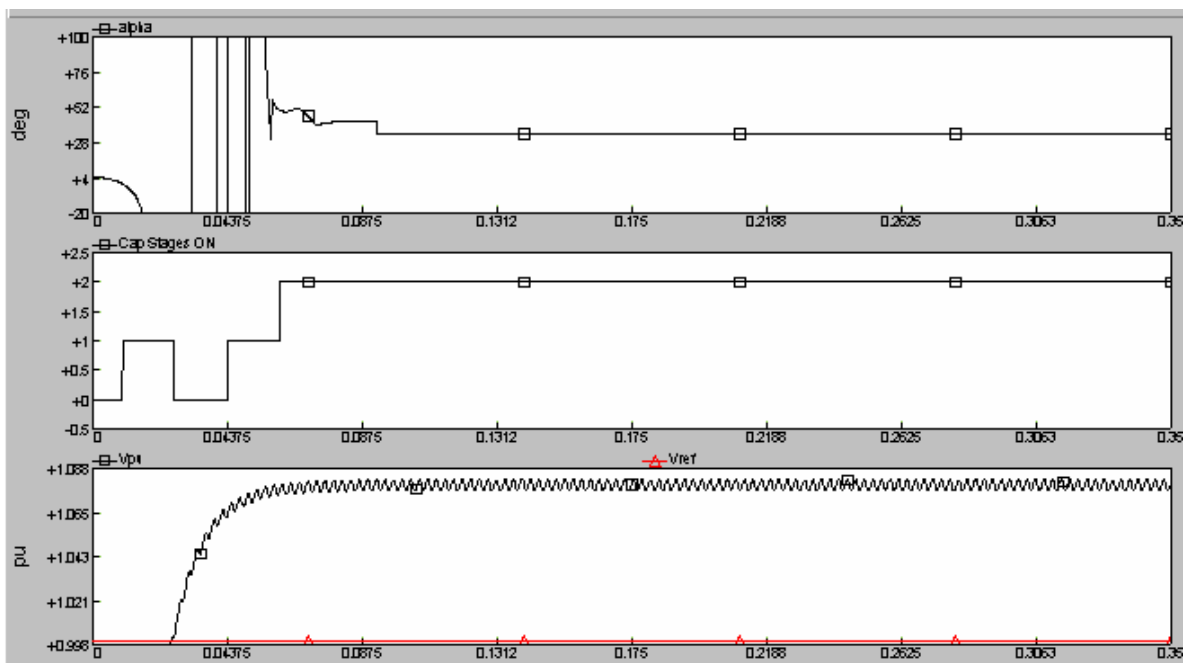


Figura 4.9 Respuesta del SVC con control difuso nueve reglas.

La figura 4.9 presenta estas variaciones en las señales de control y muestra además una alta frecuencia de oscilación en el voltaje de salida (contenido de armónicos no nulo). Tampoco se detecta inmunidad a las variaciones en las ganancias de las variables e , de y u . Pues a valores altos de la ganancia de u (ku), el ángulo alfa es inestable hacia el lado positivo (crece a niveles muy elevados) y viceversa.

4.3.2. CONTROL FUZZY CON 49 REGLAS

La base de conocimiento se presenta en la tabla 3 y la figura 4.10 contiene el esquema de control difuso 49 reglas. Inicialmente se prueba el algoritmo de control alimentándolo con valores de prueba y los resultados gráficos del control se detallan en la figura 4.11.

Por ser de mayor tamaño la base de reglas exige más espacio de memoria y mayor tiempo de procesamiento del algoritmo; pese a estos requerimientos la respuesta u , no es tan satisfactoria como la que se obtuvo con la estrategia anterior. Esto se deduce del incremento en los límites de variación de la respuesta, que además presenta oscilaciones de alta frecuencia aumentando la inestabilidad de la señal. De aquí se desprende el comportamiento insatisfactorio del SVC; alta presencia de oscilaciones en el ángulo alfa y una señal de control de la rama capacitiva con algunos altibajos cuando se produce la exigencia de reactivos de compensación (ver figura 4.11).

Tabla 3. Base de conocimiento control difuso 49 reglas

	7	7	7	7	6	5	4
	7	7	6	6	5	4	3
	7	6	5	5	3	2	1
R =	7	6	5	4	3	2	1
	7	6	5	3	3	2	1
	6	4	3	2	2	1	1
	4	3	2	1	1	1	1

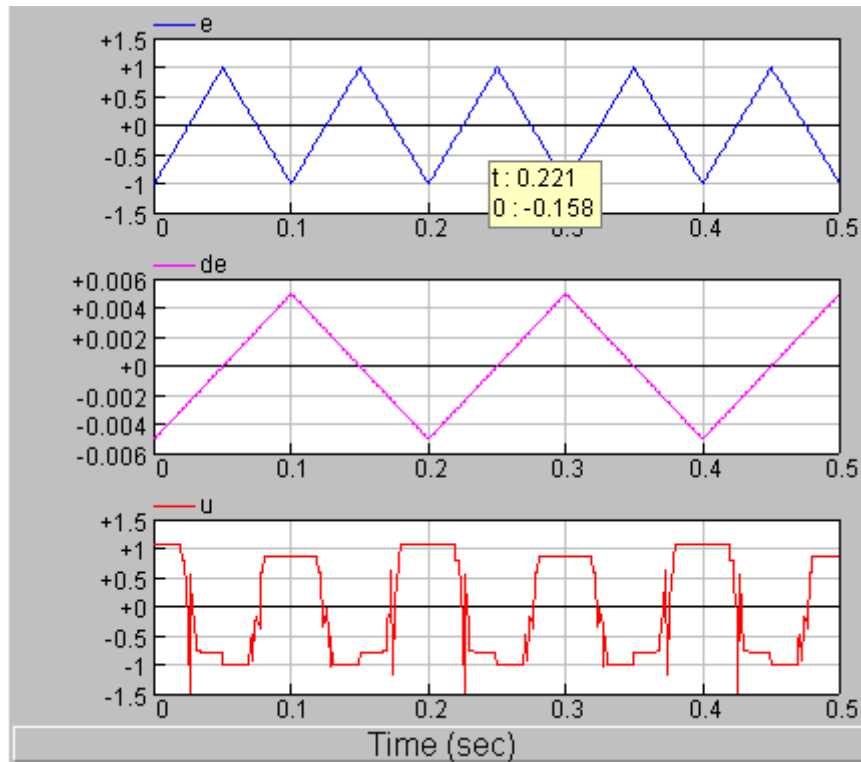


Figura 4.10 Respuesta del control difuso 49 reglas operando con entradas de prueba.

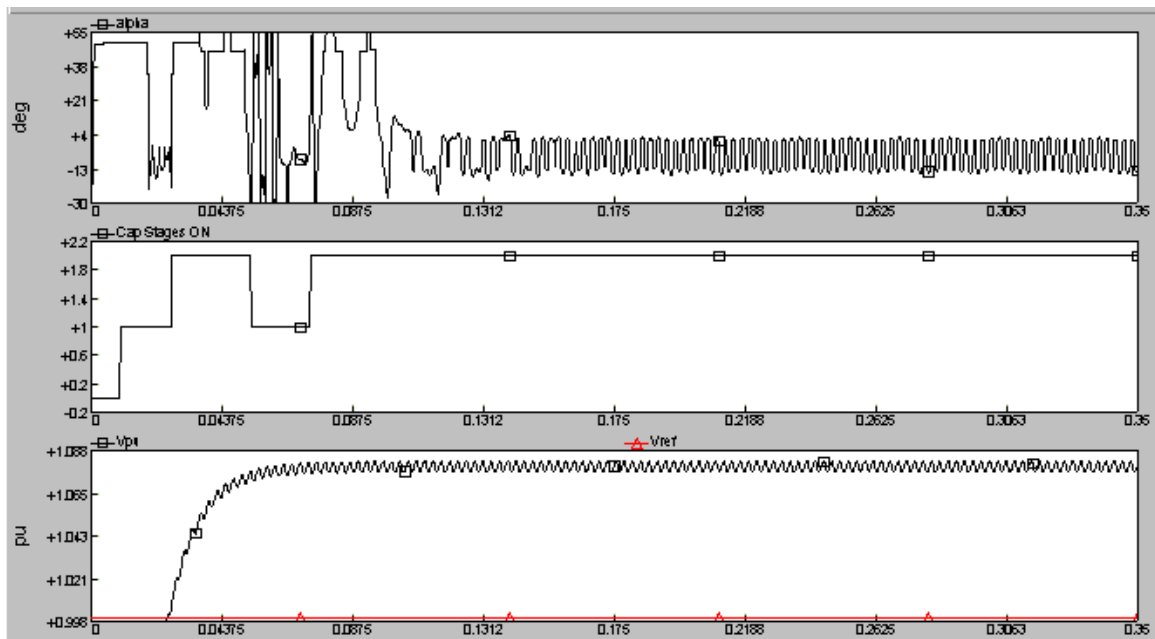


Figura 4.11 Respuesta del SVC con control difuso 49 reglas.

Se aprecian además oscilaciones de poca amplitud, pero de alta frecuencia en el voltaje de salida (contenido de armónicos no nulo). Como contraparte se establece una gran inmunidad a las variaciones en las ganancias de las variables e , de y u .

4.3.3. CONTROL DIFUSO CON NUEVE REGLAS (CONOCIMIENTO BASADO EN UN CONTROL CLASICO DE UN SVC)

La base de conocimiento que se observa en la tabla 4 se obtiene observando el comportamiento del SVC en presencia de un control clásico tipo PI representado en la figura 4.12. Inicialmente se prueba el algoritmo de control alimentándolo con valores de prueba y los resultados gráficos del control se detallan en la figura 4.13.

Tabla 4. Base de reglas difuso (basado en control clásico de un SVC)

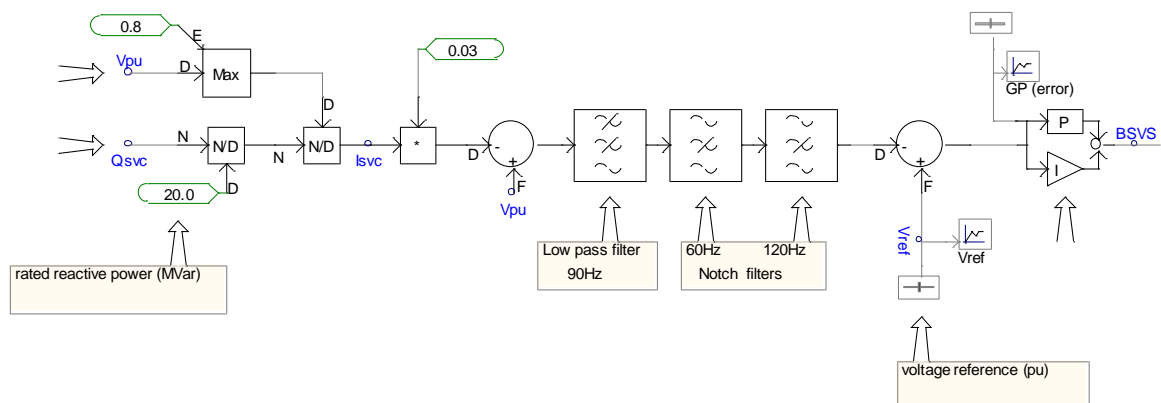
$$R = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$


Figura 4.12 Esquema básico control clásico (PI) (ambiente PSCAD)

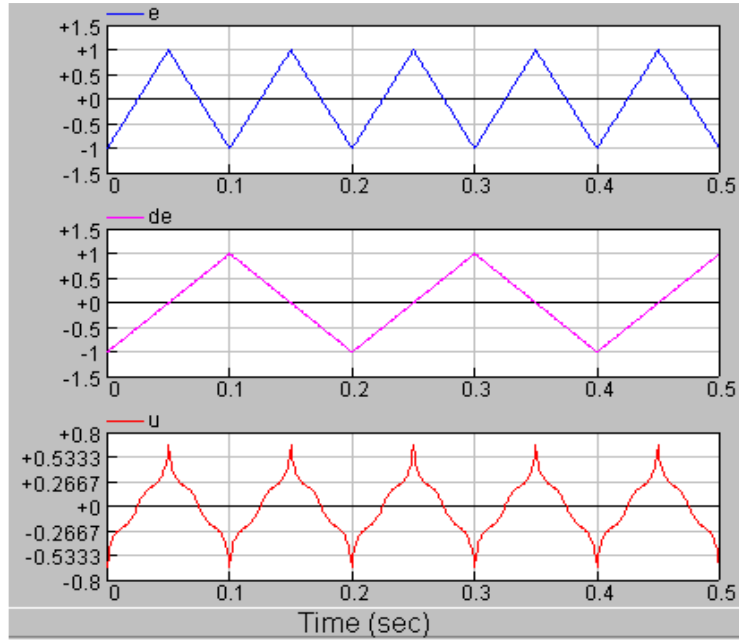


Figura 4.13 Respuesta control difuso 9 reglas (base de reglas control clásico del SVC).

La estrategia de control difuso así constituida se ubica en la rama de control del SVC con el animo de imitar la operación del control clásico SVC (ver figura 4.14).

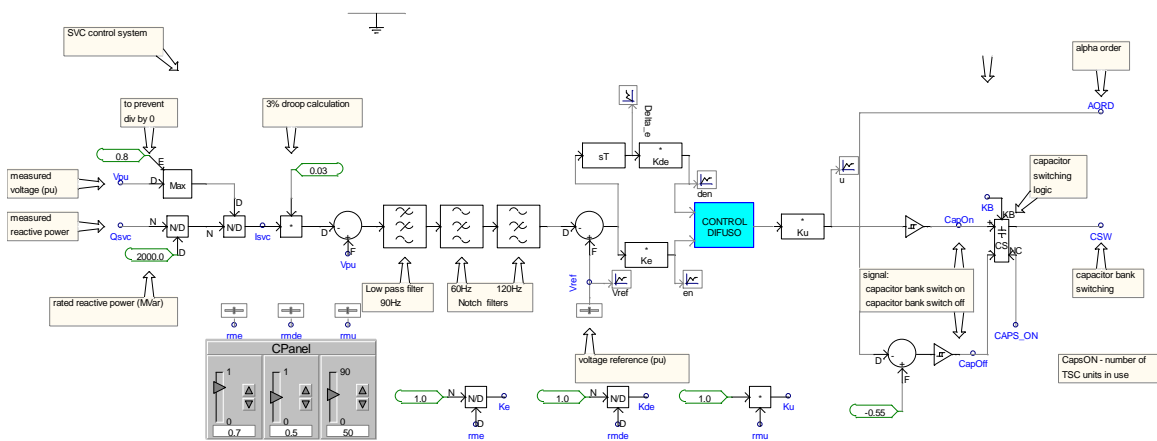


Figura 4.14 Esquema control difuso nueve reglas (base de reglas control clásico del SVC). (ambiente PSCAD)

La respuesta del SVC con la estrategia de control difuso en similitud a un control clásico se aprecia en la figura 4.15. La señal de control del ángulo (α) tiene un carácter oscilante de alta frecuencia que la hace poco atractiva, sobretodo en régimen permanente. En cuanto a la rama capacitiva posee oscilaciones tan solo en el momento de exigencia de reactivos hacia la red. Y finalmente el gráfico de tensión muestra variaciones indeseables por su carácter contaminado con oscilaciones de alta frecuencia (contenido armónico no nulo).

En cuanto a la inmunidad del sistema con respecto a las variaciones en las ganancias (k_e , k_{de} , k_u), es alta; sin embargo se recomienda utilizar por lo menos la ganancia k_u en un nivel alto para obtener buenos resultados.

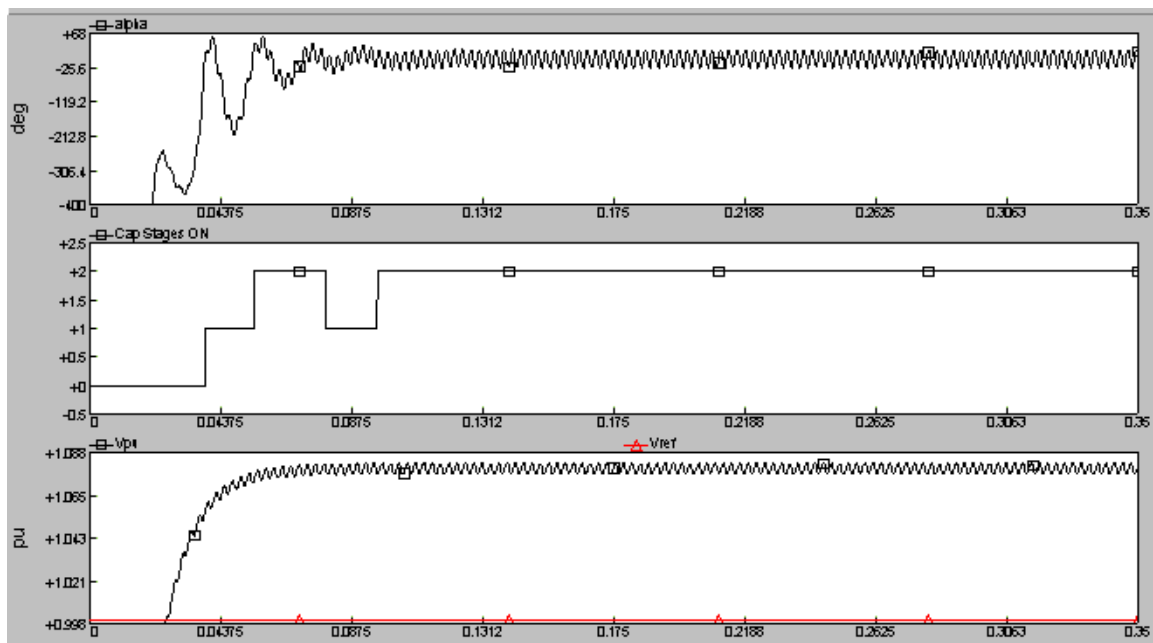


Figura 4.15 Respuestas del SVC operando con control difuso nueve reglas y estrategia de control similar a la de un control clásico.

4.4. ESTRATEGIA DE CONTROL CLASICO

La figura 4.16 presenta el montaje esquemático del control clásico. Enmarcado en la teoría clásica de control; el SVC se manifiesta acertivo a las variaciones de reactivos que demanda la red. Sin embargo, revela oscilaciones en las señales de control; enfatizándose en el ángulo alfa y en el voltaje regulado del sistema (rizado en el perfil de voltaje y contenido armónico no nulo) (ver figura 4.17).

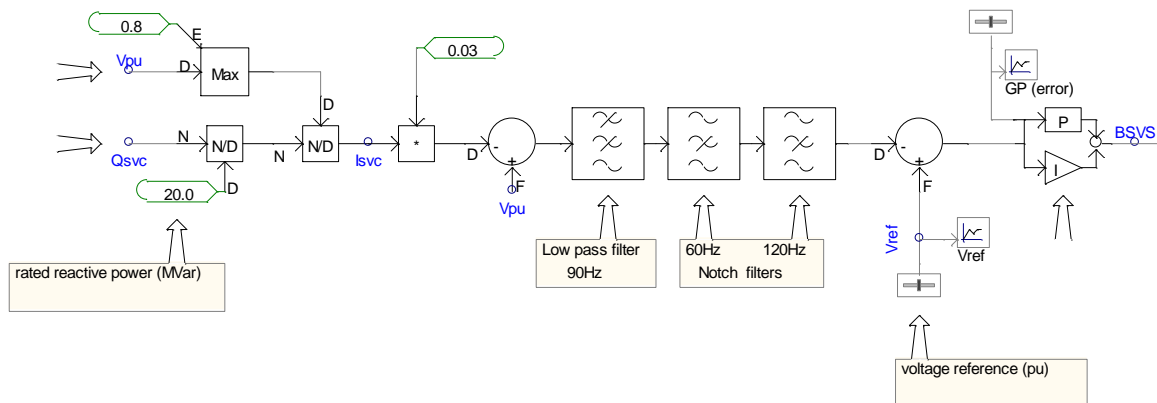


Figura 4.16 Esquema básico control clásico (PI) (ambiente PSCAD)

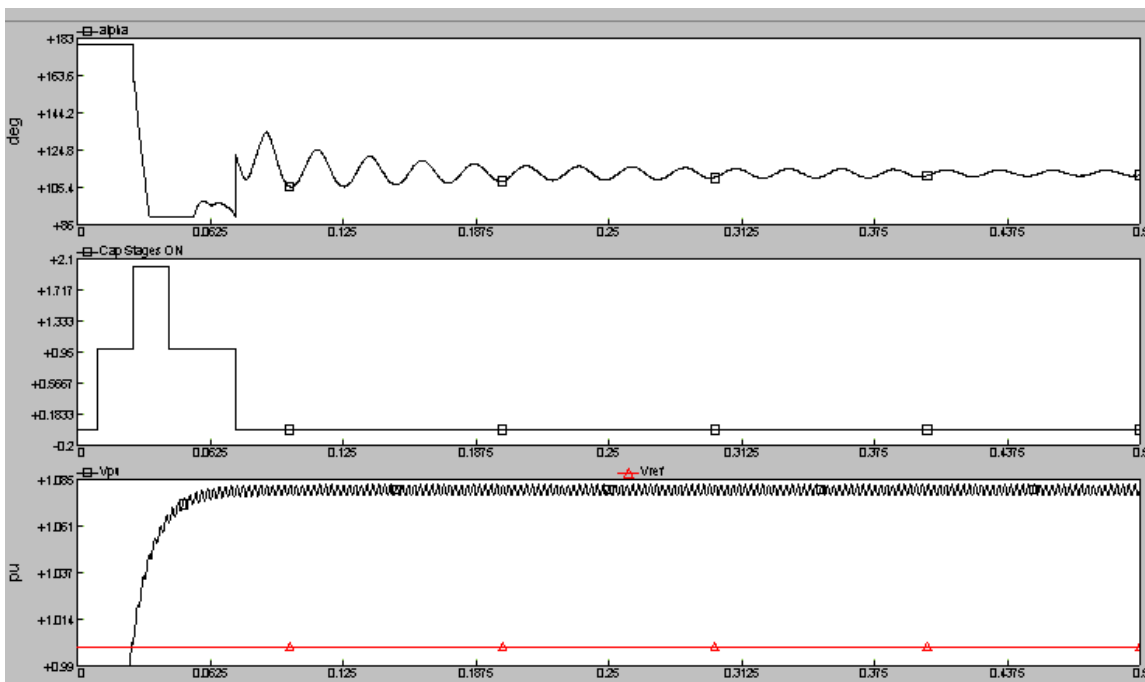


Figura 4.17 Respuesta del SVC con control clásico (PI)

(limite superior=1, limite inferior=-0.6 y constante de tiempo = 0.004s)

Los valores de las constantes de tiempo y de amplitud del control PI; juegan un papel fundamental en la respuesta del sistema; de la siguiente manera :

a. Límites de integración: Límite superior y límite inferior

Permiten incrementar la eficacia del proceso de integración, entre mayor sea el rango de la integral más rápidamente se suspende la conexión del capacitor.

b. Constante de tiempo:

Afecta directamente la frecuencia de operación del ángulo alfa y de la rama capacitiva. A valores altos las variaciones en estas dos señales de control son leves y a valores bajos de la constante de tiempo las señales de control alcanzan altas frecuencias de operación.

A pesar de que se alteren los valores de la constante de tiempo y/o de los límites de integración; el rizado en la curva de tensión del sistema persiste; presentando un forma de onda contaminada (contenido armónico no nulo).

4.5. ESTRATEGIA DE CONTROL NEURODIFUSO CON ENTRENAMIENTO POR ALGORITMOS GENETICOS

Los algoritmos genéticos se basan en la mecánica de selección natural y de la genética y utilizan la información histórica para encontrar nuevos puntos de búsqueda de una solución óptima del problema [4]. Siendo una robusta herramienta de optimización por que emula la evolución biológica como estrategia para resolver un problema matemático, requiere de muchas iteraciones para asegurar el mínimo error.

El términos generales el algoritmo genético funciona de la siguiente manera: en cada generación, se crea un conjunto nuevo de "criaturas artificiales" (cadenas) utilizando bits

y partes más adecuadas del progenitor. Esto involucra un proceso aleatorio que explota la información histórica para especular sobre nuevos puntos de búsqueda, esperando un funcionamiento mejorado [5].

El algoritmo combina (cruza) la supervivencia de los individuos más compatibles entre las estructuras de cadenas, con una estructura de información ya aleatorizada (evolución de los individuos via mutaciones, recombinaciones, etc.), intercambiada para construir una subrutina de búsqueda; es la selección natural, donde el mejor tiende a sobrevivir y reproducirse, propagando así su material genético a posteriores generaciones [5],[6]. (Ver figura 4.18)

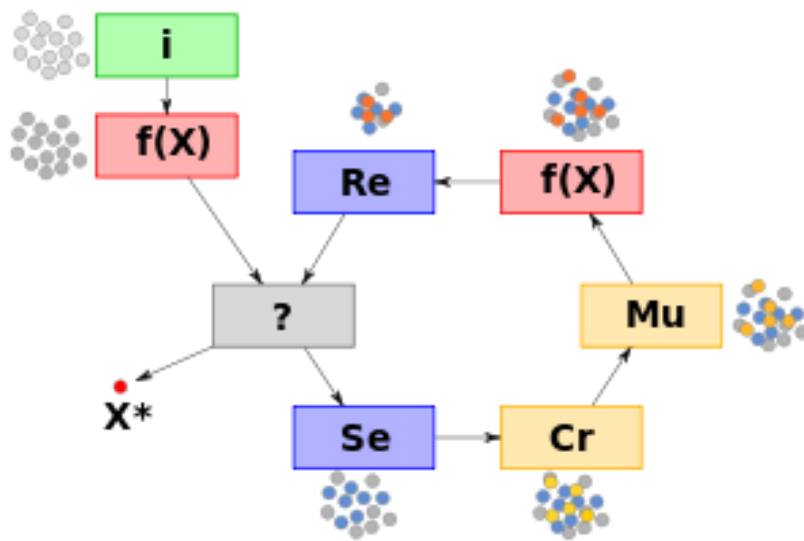


Figura 4.18 Algoritmo genético, etapas constitutivas

Algoritmo genético : **i** : inicialización, **f(X)**: evaluación, **Se**: selección,
Cr: cruzamiento, **Mu**: mutación , **Re**: reemplazo,
X*: mejor solución.

Es así, como el aprendizaje de las particiones difusas en los antecedentes lo hace el algoritmo genético, que incluye el número de etiquetas de cada partición y las reglas de cada etiqueta. El aprendizaje de los consecuentes se realiza mediante mínimos cuadrados. Se parte de una matriz poblacional de 128 filas y 50 columnas alimentada con datos binarios de manera aleatoria; donde cada vector columna es un cromosoma ó individuo con 128 elementos (i : inicialización). Cada individuo se decodifica formando matrices llamadas antecedentes; dichas matrices construyen la red neuronal de 5 capas. La primera capa consta de ocho neuronas que contienen información de los antecedentes e información de las entradas e y de . La segunda capa consta de 4 neuronas y entrega el producto de las funciones de pertenencia cuyo resultado alimenta la tercera capa de 4 neuronas que combina (cruza) y normaliza los resultados (ver figura 4.19).

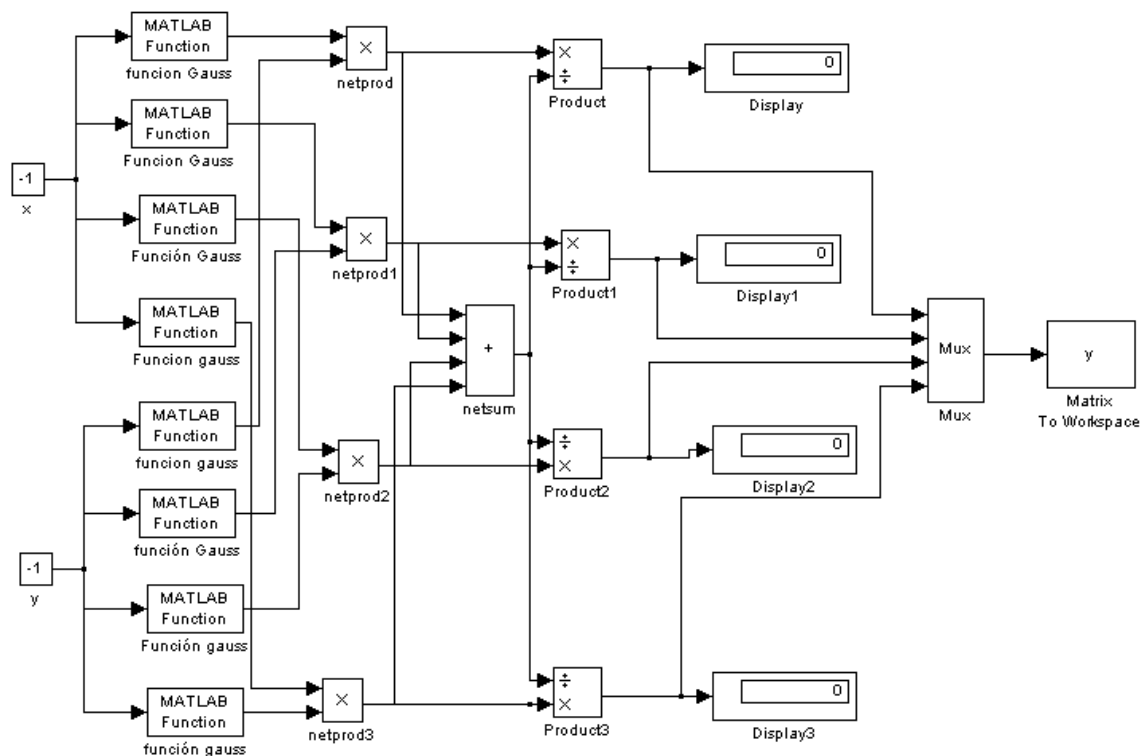


Figura 4.19 Red Neuronal 8-4-4-4-1 que opera bajo la filosofía del control neurodifuso con algoritmos genéticos (ambiente Simulink)

Finalmente la quinta capa suma todas las salidas de la cuarta capa y les resta la salida ideal u (vector de consecuentes). Esta diferencia es el error que entrega la red neuronal entrenada. Con cada visita del algoritmo a cada uno de los 50 individuos se chequea un valor objetivo del error y se determina si el individuo es candidato a conformar la nueva población de los individuos fuertes ó a ser desechado ($f(X)$: evaluación).

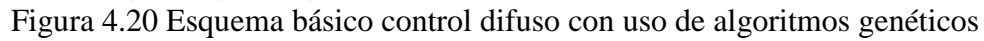
Luego de conocer las respuestas de todos los individuos se realiza la selección (Se), cruzamiento (Cr) y mutación (Mu) a toda la nueva población obtenida; con el objeto de crear una generación más fuerte (Re). Una vez se alcanza este nivel se repite el proceso hasta alcanzar un error igual o menor a un valor mínimo determinado (X^* : mejor solución).

La filosofía empleada en este algoritmo se caracteriza por :

- Optimizar antecedentes por algoritmos genéticos (obtención de los parámetros de la red neuronal)
- Obtención de consecuentes a partir de un vector de salida u modificado a través de operaciones algebraicas y optimizado por medio de mínimos cuadrados.

Este conocimiento a priori del vector de salida u , hace que el método de mínimos cuadrados tenga un mejor desempeño; observándose una evolución segura y certera de la población hacia un óptimo global más ágilmente.

La figura 4.20 reúne el esquema de control difuso en ambiente PSCAD, que básicamente es el mismo esquema que se ha presentado en anteriores controles, modificando el algoritmo de control en cada caso específico.



The figure consists of three vertically stacked plots sharing a common x-axis representing time from 0 to 0.5 seconds.

- Top Plot:** The y-axis is labeled "deg" and ranges from -0.28 to +0.5. The signal, labeled α , starts at +0.5, drops sharply to approximately -0.124, and then stabilizes at +0.032. Data points are marked with open squares.
- Middle Plot:** The y-axis ranges from -0.5 to +2.5. The signal, labeled "Cap Stages ON", starts at 0, steps up to +1.0, and then to +2.0 at approximately 0.03 seconds. Data points are marked with open squares.
- Bottom Plot:** The y-axis is labeled "m" and ranges from +0.996 to +1.055. It contains two signals: v_{pi} (black line with open squares) and v_{ref} (red line with open triangles). v_{pi} starts at +0.996, rises to +1.055 by 0.03 seconds, and then exhibits high-frequency noise around +1.055. v_{ref} remains constant at +0.996.

56

4.5. CUADRO COMPARATIVO DE DESEMPEÑO

La tabla 5 es un resumen de resultados de cada uno de los algoritmos simulados presentando de manera cualitativa las características, beneficios o defectos de cada uno.

En este cuadro comparativo se observa como el algoritmo Chao Et Al es la herramienta de control de mayor efectividad cuando asiste a un SVC en derivación compensando una carga tipo RL de bajo fp (similar a la presentada por un transformador eléctrico durante las pruebas de medición de pérdidas ó en la prueba de calentamiento y sobrecarga).

Tabla 5. Comparación de las diferentes estrategias de control simuladas

ALGORITMO	CARACTERISTICAS		
	Tipo de algoritmo	Señales de control	Perfil de tensión
Chao Et Al	Sencillo	muy suaves, poca o ninguna variación	Suave sin variaciones
Li Xi Wang	Sencillo	suave con poca variación	Rizado de baja cuencia
9 reglas	Sencillo	alta variación y suave comportamiento en regimen permanente	Rizado de baja frecuencia
49 reglas	Medianamente complejo	Muy alta variación cuando se exigen reactivos y baja frecuencia en regimen permanente	Rizado de baja frecuencia
9 reglas (basado en control clásico)	Complejo	Mediana variación cuando se exigen reactivos y baja frecuencia en regimen permanente	Rizado de baja frecuencia
Clásico (PI)	No posee	Baja variación cuando se exigen reactivos y muy baja frecuencia en regimen permanente	Rizado de baja frecuencia
Algoritmos Genéticos	Complejo	muy suaves, ninguna variación	Rizado de baja frecuencia

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] Robert Fullér. Neuro-Fuzzy Methods for Modelling Fault Diagnosis. Eötvös Loránd University, Lisbon. August 31 and September 1, 2001.
- [2] Chao, C.T., Y.J. Chen and C.c. Teng. Simplification of Fuzzy-neural systems using similarity analysis. IEEE. Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Par B. (1996).

- [3] L.X. Wang and J.M.Mendel. Generating fuzzy rules by learning from examples. IEEE Transactions Syst., Man, Cybern., vol. 22, pp. 1414-1427, 1992.
- [4] Oscar Cordon, Francisco Herrera and Pedro Villar, Generating the Knowledge Base of a Fuzzy Rule-Based System by the Genetic Learning of the Data Base, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.9 No.4 , August 2001 IEEE.
- [5] Un Algoritmo Genético para Aprendizaje de un Sistema Basado en Reglas Difusas tipo Takagi Sugeno. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, E.T.S. Ing. Informática, Avda. Andalucía, 18, 18071 Granada (España). (<http://decsai.ugr.es/~casillas/FMLib/>)
- [6] Piedad Tolmos Rodríguez-Piñero Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones. . (www.uv.es/asepuma/X/J24C.pdf)

CAPITULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 GENERALIDADES

En este capítulo se establece la topología adoptada y las pautas más apropiadas para implementar el aplicativo del control del SVC por diversas estrategias y técnicas de control moderno.

Estas técnicas de control se basan en una estrategia diferente dependiendo del concepto matemático base: algoritmos neurodifusos, controles difusos, controles neurodifusos entrenados por algoritmos genéticos y controladores PI; como herramientas de asistencia en el control eficaz de un compensador de var estático SVC.

Después de haber obtenido resultados satisfactorios mediante simulación en PSCAD se presenta validación en el mundo real de las teorías aplicadas mediante prototipo del SVC que basa su operación en el procesamiento de los algoritmos de control expuestos. Las respuestas del SVC construido deben ser muy cercanas a las del modelo simulado en PSCAD comprobando así la efectividad del dispositivo.

La figura 5.1 permite tener una visión completa del montaje experimental construido, donde se destacan la simplicidad de las interfases y la modularidad del arreglo para permitir labores de mantenimiento, mejoramiento y lectura de parámetros del circuito. A lo largo de este capítulo se describen brevemente cada una de las partes componentes del montaje, el diagrama de flujo del algoritmo general de control que se utiliza para cualquiera de las estrategias de control que se implemente y algunas de las curvas

obtenidas de manera experimental, que muestran el grado de exactitud del control y por lo tanto, sirve como mecanismo de validación del ejercicio.

La tabla 6 reúne el conjunto de materiales empleados durante la construcción del prototipo monofásico. Para simular la carga se utilizó un motor monofásico de inducción (circuito equivalente RL), los registros de las variables $e(t)$, $de(t)$, $u(t)$ en forma gráfica se pueden observar en la sección 5.11.

En cuanto a la operación del circuito de control la figura 5.2 brinda una visión general del diagrama de bloques del proceso de control; que describe la secuencia lógica de actividades que termina con la salida $u(t)$, y después del acondicionamiento pasa a alimentar la puerta (G) de los tiristores (actuadores) instalados en el área de potencia.

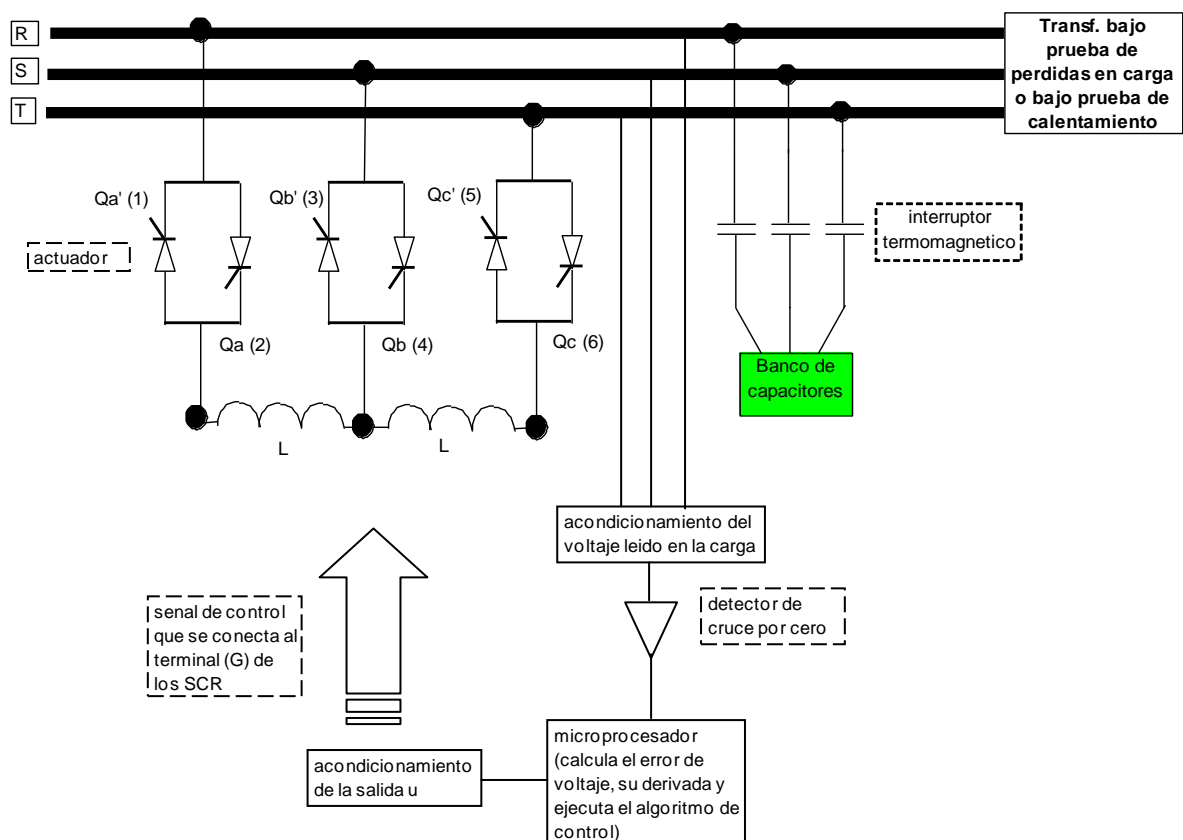


Figura 5.1 Vista general del prototipo del SVC

Tabla 6. Listado de materiales utilizados para la construcción del prototipo

LISTADO DE MATERIALES UTILIZADOS (montaje monofasico)	
	cantidad
capacitor de 5kVAR, 120 VAC	1
inductancia 1,407 H, 3A, 120 VAC	1
motor 1F, 1/2 hp, 120 VAC (*)	1
SCR C106 M, 600V, 4A	2
microprocesador Motorola GP32	1
optoacoplador MOC3021	2
diodo rectificador RL204, 2A, 400V	4
amplificador operacional LM321	1

(*) se utiliza un motor de induccion por similitud del transformador en prueba

Una vez se tienen las entradas acondicionadas (e y de) se ejecuta el algoritmo de control sea cual sea la estrategia seleccionada (neurodifuso, difuso, clásico PI, neurodifuso entrenado por algoritmos genéticos, etc.). Este proceso matemático genera a su vez una salida de control u que después de ser acondicionada se envia al actuador para mantener una señal de voltaje en la carga lo mas cercana posible al nivel de voltaje de referencia (voltaje de referencia = 5V).

Los procesos de acondicionamiento de señal a la entrada y a la salida del sistema; así, como la detección del cruce por cero y la acción a realizar (actuador) se realizan mediante elementos circuitales análogos por cada fase, lo cual aumenta la confiabilidad del sistema y ayuda a modularizar el prototipo facilitando actualizar, mejorar y probar de manera independiente cada parte.

En cuanto a los procesos de cálculo del error, cálculo de la derivada del error y operación de los algoritmos de control son efectuados por el microcontrolador Motorola GP32 [1] dada la complejidad y cantidad de las operaciones matemáticas necesarias; la

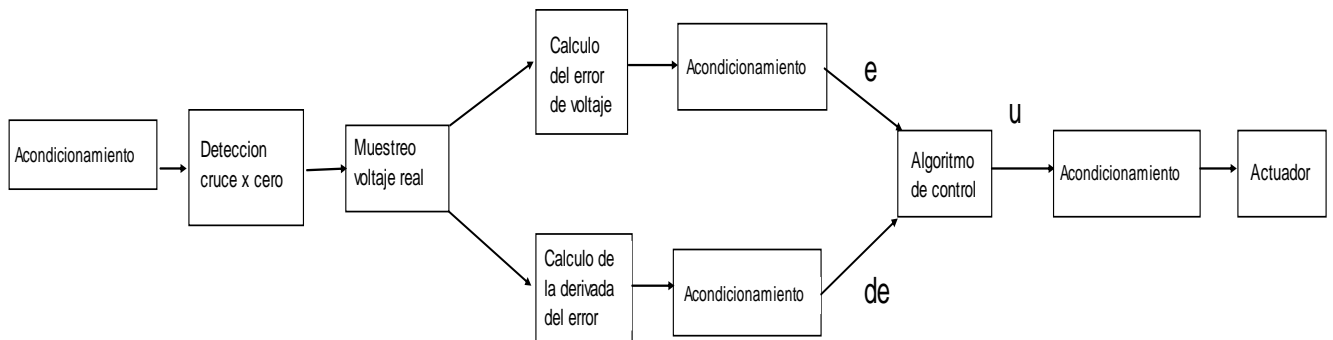


Figura 5.2 Diagrama de bloques del proceso de control del SVC, incluyendo acondicionamiento de señales.

precisión y repetitividad que el proceso de control demanda en este tipo de enfoques.

5.2 ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VOLTAJE

Como consideraciones preliminares :

- La señal de la red no tendrá distorsiones armónicas mayores al 0.5% (THD<1),
- Frecuencia = $60 \pm 10\%$ Hz.
- Rango de variación permitido en la señal de voltaje ($\pm 10\%$) (seleccionado para evitar un alto switcheo de los tiristores).
- El muestreo de la señal de voltaje se efectuará en el punto donde se requiere corregir el fp; lugar donde se ubica el SVC; de esta forma se puede establecer una acción de control para el circuito aguas arriba del SVC.

Con el muestreo de la señal de voltaje se alimenta la primera etapa del SVC reduce los voltajes de la red a niveles menores a 5Vrms, de tal manera que puedan ser compatibles con el rango de entrada recomendado para el microcontrolador (-5,+5). Cada fase alimenta un transformador monofásico reductor (figura 5.3); conformando un pequeño

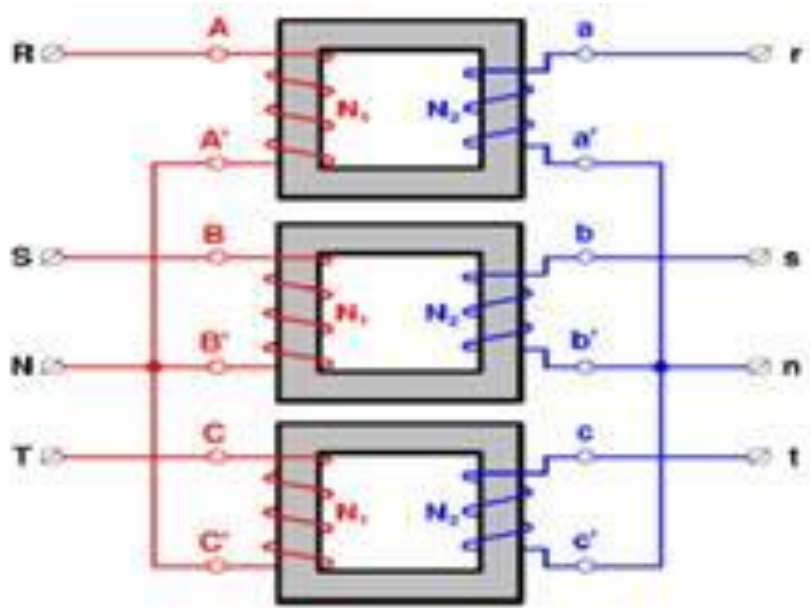


Figura 5.3 Banco de tres transformadores monofásicos YNyn0

banco de transformación (150W de capacidad total) en conexión YNyn0; la relación de transformación es de 110/ 9 con tap central.

La filosofía del control implementado se basa en la operación monofásica de una onda de voltaje, siendo suficiente con el manejo y estudio de una sola de las fases para determinar el procesamiento de todas las tensiones (similitud del sistema monofásico bajo el concepto de alimentación de un sistema balanceado).

5.3 DETECCION DE CRUCE POR CERO

Una de las necesidades del prototipo es conocer el momento en que la señal de voltaje a compensar inicia o termina un ciclo (onda seno). Razón por la cual la fase a analizar, ingresa al circuito a través de un par de diodos conectados como filtro de media onda; que a su vez alimentan el terminal no inversor de un amplificador operacional (LM321) conectado como comparador para determinar el cruce por cero; indicado a través de un pulso de tensión a la salida (ver figura 5.4). Con esta pequeña pulsación de 120Hz, se

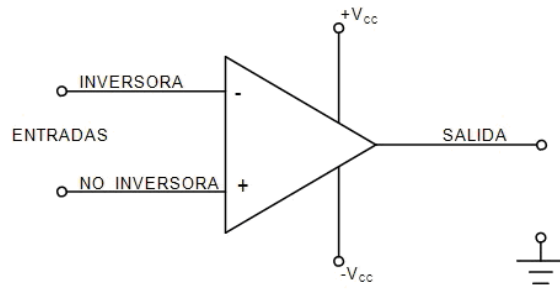


Figura 5.4 Esquema básico amplificador operacional

indica al microprocesador cuando iniciar el conteo y cuando detener el proceso de muestreo de la señal (la figura 5.5 presenta las formas de onda a la entrada y a la salida del circuito detector de cruce por cero).

En la salida del amplificador operacional el ancho de los pulsos de tensión alcanza una duración de $250\mu\text{s}$ como máximo que equivalen a 5.4° . En este pequeño lapso de tiempo no hay procesamiento de datos, ni ejecución del algoritmo de control y por lo tanto, no se ejerce control directo en los elementos de compensación de reactivos.

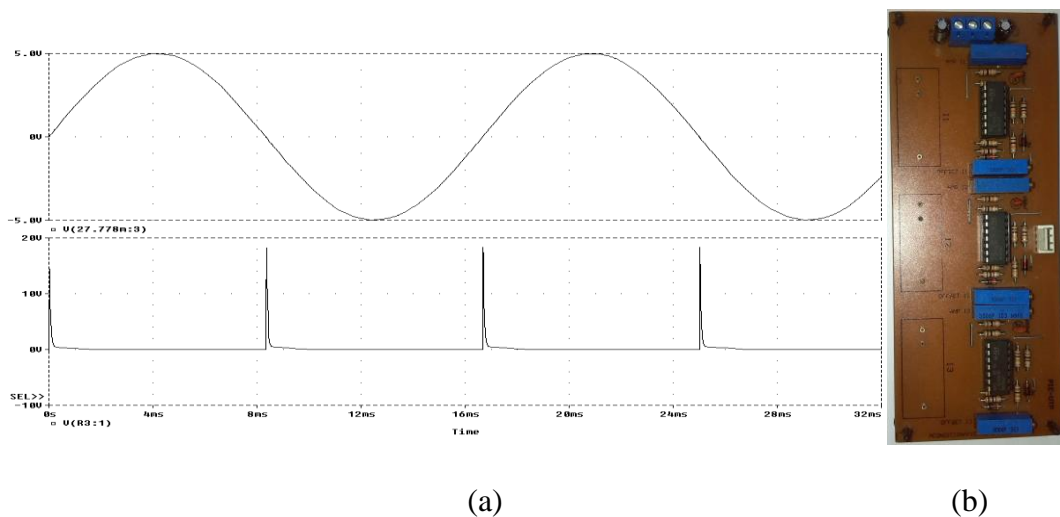


Figura 5.5 Formas de onda de voltaje del detector de cruce por cero.

Voltajes de entrada no invertidora y de salida (a), montaje real trifásico (b)

5.4 MUESTREO DEL VOLTAJE REAL

La etapa de control realiza el procesamiento de las señales muestreadas durante el primer semiciclo, el resultado de dicho proceso indicara una acción a seguir, la cual se ejecuta en el siguiente semiciclo (generando un retraso de 8,33ms entre la lectura y la acción de control). Este retraso no evidencia problema debido a la naturaleza de la carga (circuito RL, típico de un transformador de distribución durante la prueba de calentamiento o la medición de pérdidas en carga).

Una vez se genera el cruce por cero se ejecuta el algoritmo de control que procesa los datos y al final establece un resultado (acción de control). La lectura de voltaje ó muestreo de voltaje de la red ocurre después del cruce por cero (a los $5.4^\circ = 0,25\text{ms}$); posteriormente el procesamiento de la señal y la generación de una respuesta se produce en menos de 8,33ms (dependiendo de la complejidad del método escogido) entregando una acción de control a ejecutar después del siguiente cruce por cero. (ver figura 5.6).

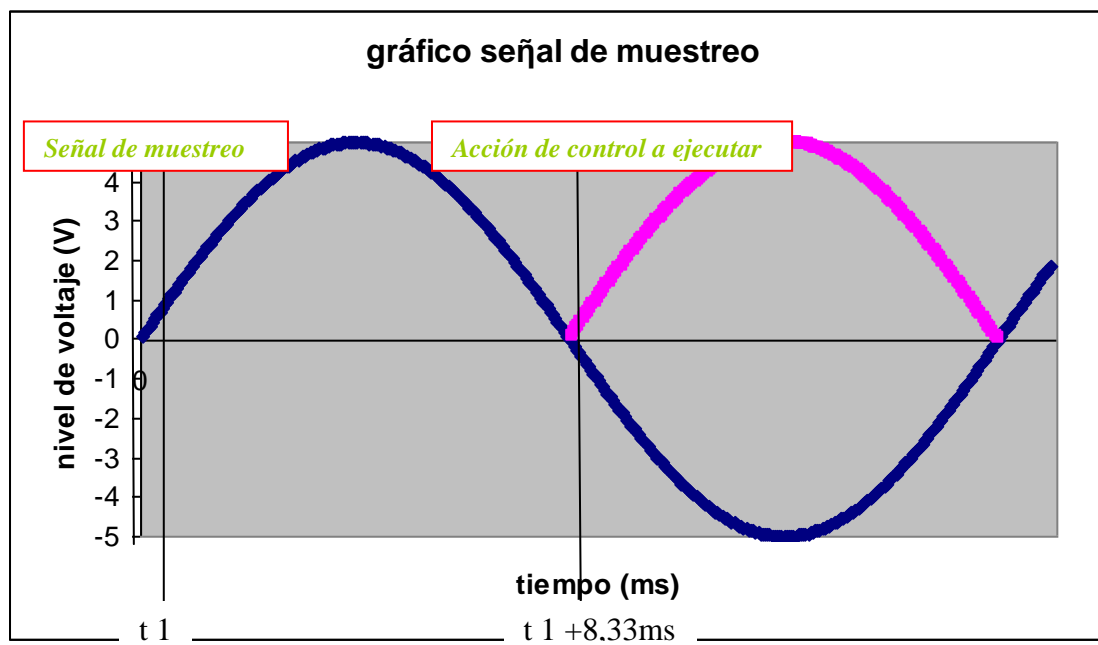


Figura 5.6 Grafico señal de muestreo (tomada después del cruce por cero cada 8,33ms)

acción de control se realiza en semiciclo posterior al semiciclo toma de muestra.

La onda de voltaje muestreada se hace pasar por un rectificador de onda completa (ver figura 5.7) obteniendo el valor RMS de la onda de voltaje rectificada de la fase. El SVC compensara los reactivos del sistema dependiendo de la comparación de este valor RMS con el valor de referencia de una onda senoidal pura de 5V pico, considerando una tolerancia de $\pm 10\%$, rango en el cual se asume aceptada la señal muestreada.

Si el voltaje en la red fluctúa por efectos de la carga; el voltaje rectificado informa con la misma fidelidad dicha fluctuación. Así, el microprocesador conoce el perfil de voltaje en el sitio de muestreo de una manera sencilla y eficiente; el esquema conjuga la contribución de ambos cuadrantes (positivo y negativo) de la onda, apalancándose en la naturaleza del rectificador de onda completa (monitoreo cada 8,33ms).

5.5 CALCULO DEL ERROR DE VOLTAJE

El voltaje de referencia es una onda senoidal pura de valor pico 5V (fig. 5.8 (a)), la tolerancia del voltaje de entrada del SVC es $\pm 10\%$ del voltaje de referencia ($\pm 0,5V$) (fig. 5.8 (b)) en este rango el actuador no opera (señal muestreada corresponde a un valor aceptado dentro de parámetros de operación del SVC), no ejecuta acción de control en este rango de la señal.

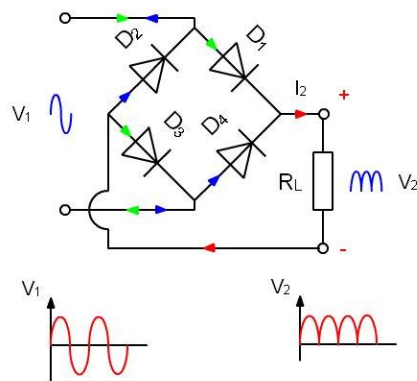


Figura 5.7 Rectificador de onda completa

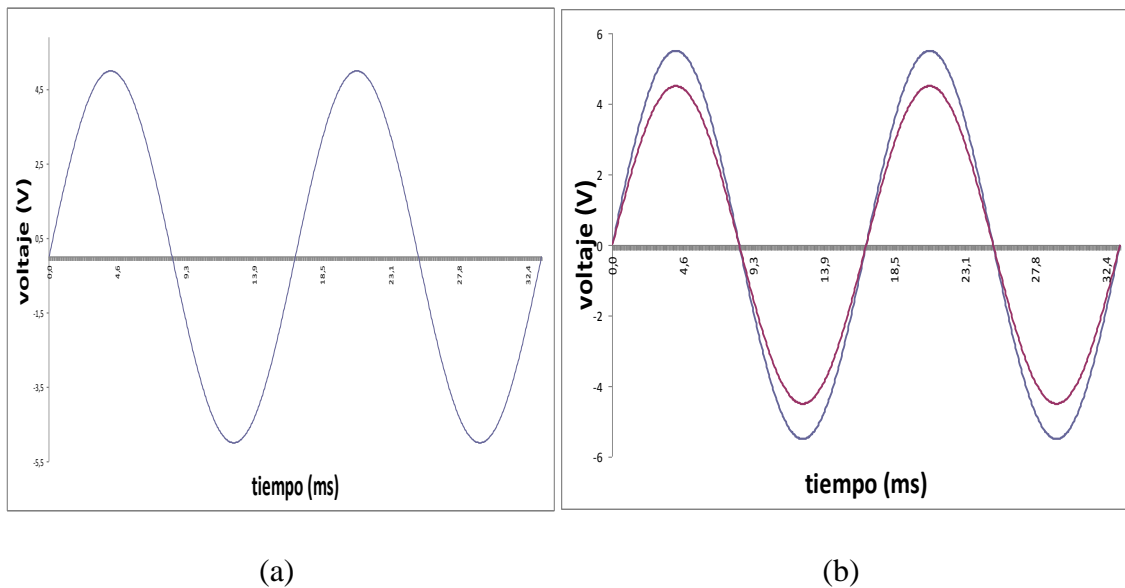


Figura 5.8 (a) Gráfica del voltaje de referencia 5Vpico, $f=60\text{Hz}$
 (b) Variación máxima y mínima de la señal de entrada (5Vpico $\pm 10\%$)

El valor RMS de la señal de voltaje de referencia rectificada es comparado con el valor RMS de la señal de voltaje muestreada rectificada (grafica 5.9). Esta comparación se realiza por medio de una función programada en el microprocesador (operación entre dos números binarios) lo cual evita aumento en el número de componentes externos, mejora la confiabilidad y tiempo de respuesta.

El error en el voltaje de la carga o sitio a compensar se establece como:

$$e_i = (V_{\text{ref}} - V_{\text{medido}}) / V_{\text{ref}} \quad (5.1)$$

Este valor se multiplica por 10 para normalizarlo entre -1 y +1

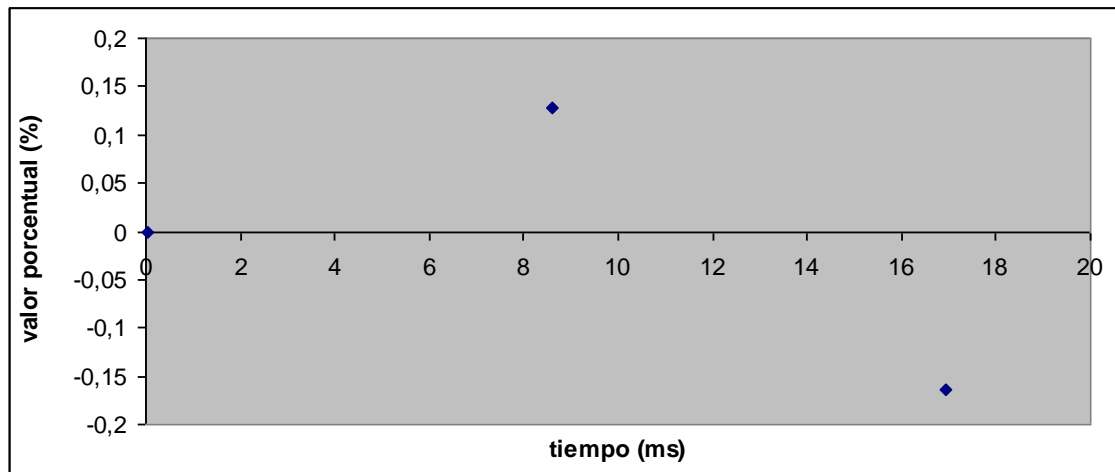


Figura 5.9 Gráfico error de voltaje (%) (entre voltaje de referencia y voltaje muestreado)

5.6 CALCULO DE LA DERIVADA DEL ERROR

Cualquiera que sea el método de control, la derivada del error es requerida, ya que permite de manera anticipada verificar la efectividad del método escogido en la compensación. La derivada del error en notación matemática es el cociente de la variación del error y la variación del tiempo :

$$\frac{de}{dt} = [e(t) - e(t-1)] / dt \quad (5.2)$$

Para pequeños lapsos de tiempo t, la variación del error se puede expresar como :

$$\Delta e_{RMS} = [e_{RMS}(k+1) - e_{RMS}(k)] \quad (5.3)$$

Tomando un tiempo de muestreo constante (8,33ms) la ecuación (5.2) se resuelve de forma práctica a partir de la lectura del voltaje muestreado una vez que se compara con el voltaje de referencia. La derivada del error siempre se calculara a partir del semiciclo anterior a la lectura muestreada actual, ecuación (5.3) como se observa en la figura 5.10.

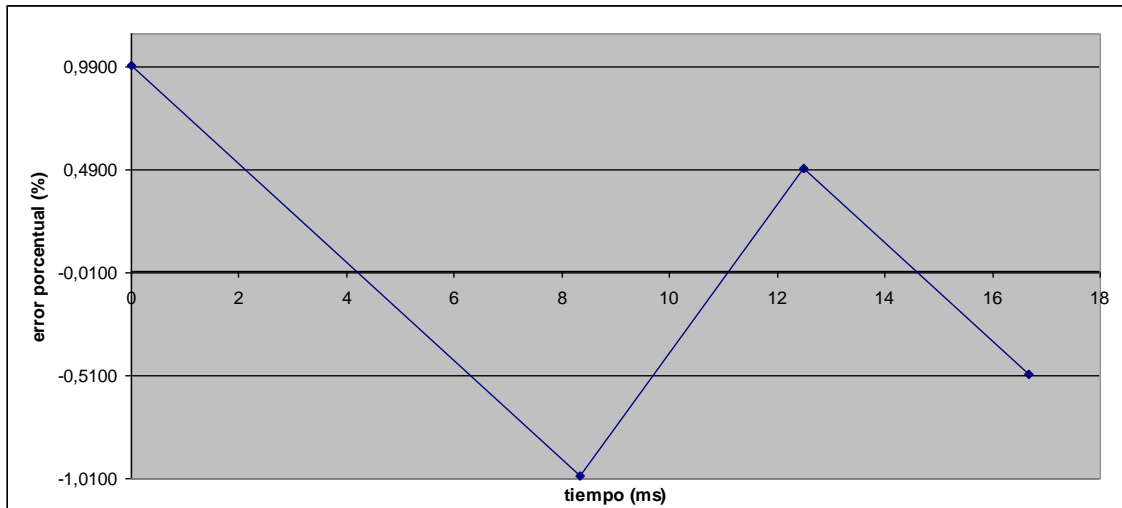


Figura 5.10 Gráfico de la derivada del error de voltaje

5.7 ALGORITMO DE CONTROL

En el capítulo tres mediante la simulación se analizaron varias técnicas de control moderno. La metodología de la comparación en términos de efectividad sirve de guía para seleccionar la más adecuada solución a un problema particular. Las técnicas de control simuladas en el algoritmo de control en el SVC, fueron :

- Chao Et Al
- Li Xi Wang
- 9 Reglas
- 49 Reglas
- 9 Reglas (basado en control clásico)
- Clásico PI
- Algoritmos Genéticos

Con el objeto de validar los resultados de la simulación y evidenciar la autenticidad de la metodología, se implementaron los algoritmos arriba mencionados captando las señales de entrada y salida (e , de , u).

El ambiente del PSCAD permite validar a través de los resultados, el correcto funcionamiento de las subrutinas de cada algoritmo y las graficas de entrada y salida (e , de , u) son la prueba de que la simulación opera correctamente. Posteriormente las subrutinas se tradujeron a lenguaje C y se implementaron en un microcontrolador GP32 (ver figura 5.11). Los resultados reales obtenidos en el Motorola GP32 arrojaron graficas de entrada y salida similares a las señales obtenidas en el capítulo cuatro. Estos gráficos validan el correcto funcionamiento de las subrutinas en ambos ambientes (simulado y real) cumpliendo los objetivos de la etapa de procesamiento de la información.

La figura 5.12 presenta un esquema lógico de las operaciones desarrolladas en la etapa de procesamiento de la información. Si el voltaje en la carga se mantiene en el rango de $\pm 10\%$ del voltaje de referencia, no se ejecuta la subrutina de control que previamente se halla seleccionado (Chao Et Al, Li Xi Wang, 9 Reglas, 49 Reglas, 9 Reglas (basado en control clásico), Clásico PI ó Algoritmos Genéticos).

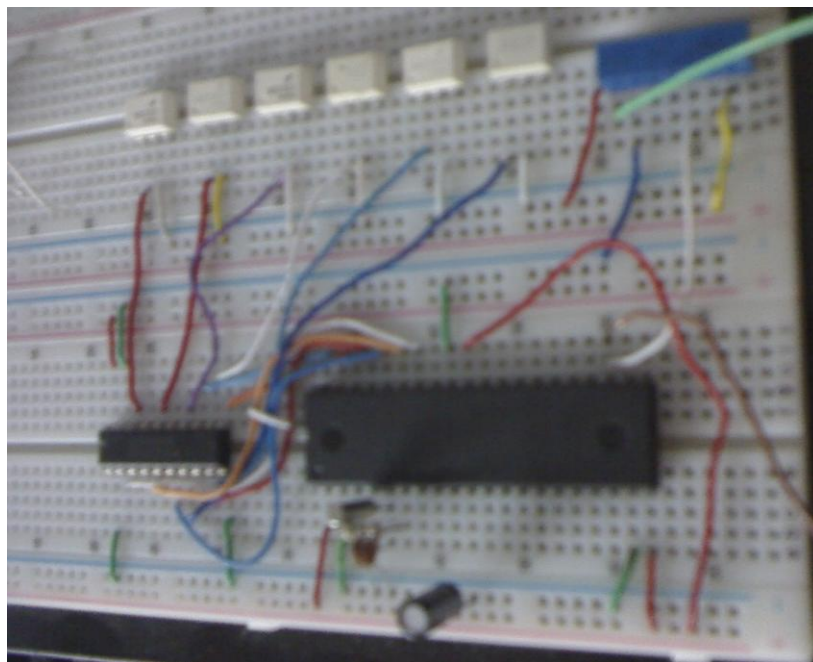


Figura 5.11 Montaje real circuito de control

El algoritmo de control monitorea la señal muestreada con el fin de establecer fluctuaciones de voltaje (variaciones en el fp). Cuando el fp fluctúa de manera ostensible

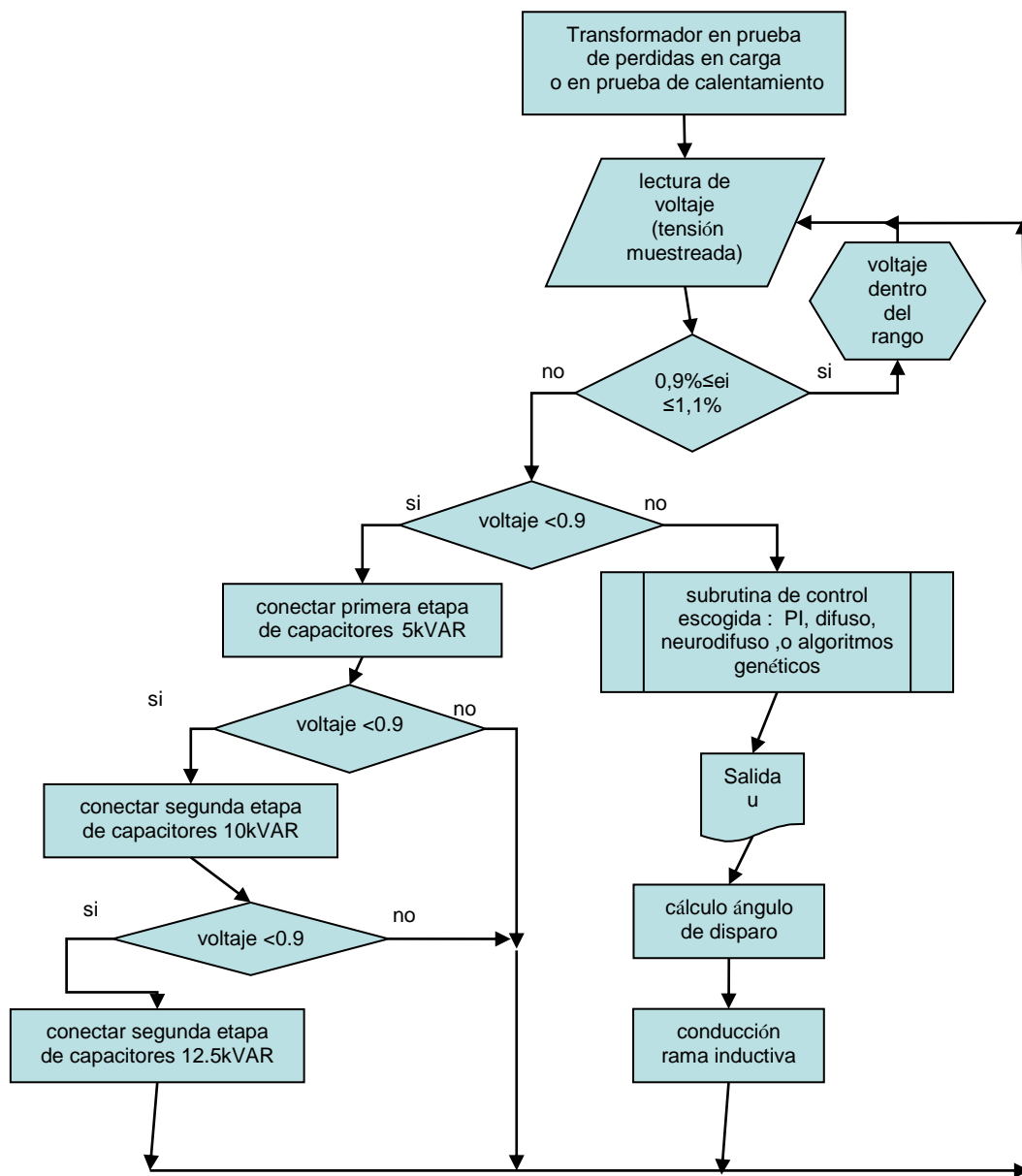


Figura 5.12 Gráfico algoritmo general de control

es detectado por el error de voltaje y de acuerdo a su signo el proceso avanza por la rama capacitiva (fp inductivo) o por la rama inductiva (fp capacitivo). En el primero se energiza un banco de capacitores y en el segundo es la subrutina de control previamente seleccionada la que hace la acción de control (su salida u será el instante de tiempo de disparo de los SCR y la energización de los inductores), siendo el objetivo principal corregir el fp que se monitorea siempre desde la tensión muestreada.

5.8 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SALIDA

Al final de cada iteración el algoritmo de control determina una de dos acciones de control [2], [3]:

- A. Energizar un banco de capacitores (a través de conexión directa efectuada por medio de un interruptor termomagnético)
- B. Generar una señal de disparo u , que será multiplicada por un factor de escala en la etapa de acondicionamiento. Se obtiene de esta forma el ángulo de disparo de los tiristores ó SCR's (rama inductiva).

La figura 5.13 a manera de ejemplo representa la salida u de un control difuso de 9 reglas antes de la etapa de acondicionamiento, notándose como en algunos instantes de tiempo la salida u alcanza altos niveles que corresponden a la inyección de reactivos inductivos o capacitivos hacia la red dependiendo del signo de dicha variable u . En cuanto a la figura 5.14 se observa el funcionamiento del SVC con diferentes niveles de capacitancia e inductancia aplicada a la carga, la capacidad del SVC está limitada por el tamaño del banco de capacitores y por el tamaño de los inductores.

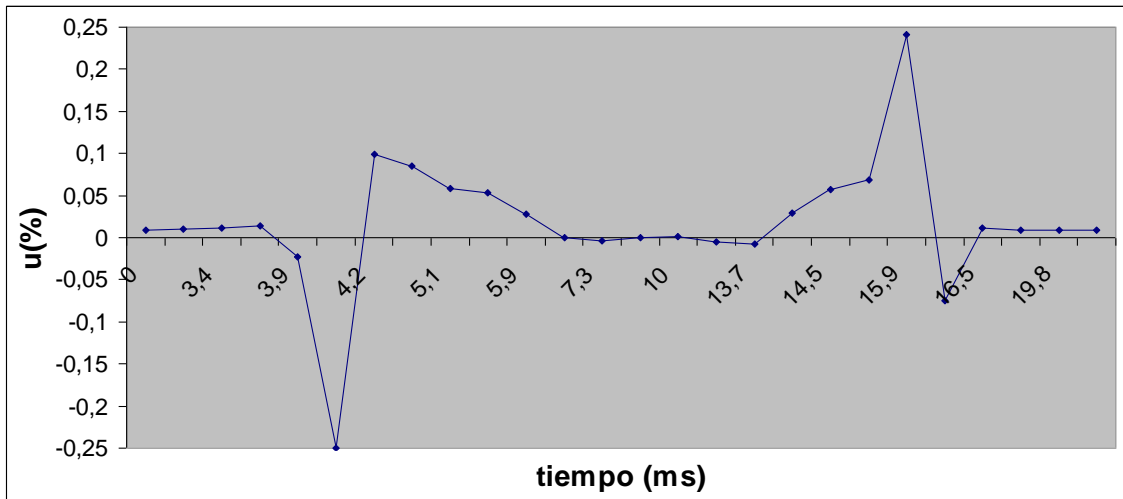


Figura 5.13 Salida u, algoritmo de control difuso 9 reglas previo al acondicionamiento

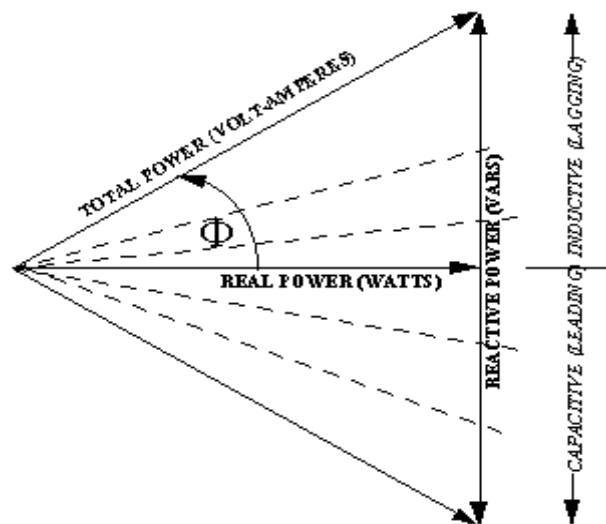


Figura 5.14 Triángulo del fp (el algoritmo de control determina la acción adecuada para mantener el voltaje de la salida en un rango de $\pm 10\%$ del valor de referencia)

5.9 ACTUADOR

Las tablas 1.2 (a) y 1.2 (b) (capítulo uno) arrojan valores consolidados de las demandas de potencia reactiva en las pruebas de medición de pérdidas (de vacío, bajo carga y prueba de calentamiento y sobrecarga) para un transformador eléctrico de hasta 2 MVA, con dichos valores se dimensiona la capacidad del SVC cuyo circuito actuador se observa en la figura 5.15.

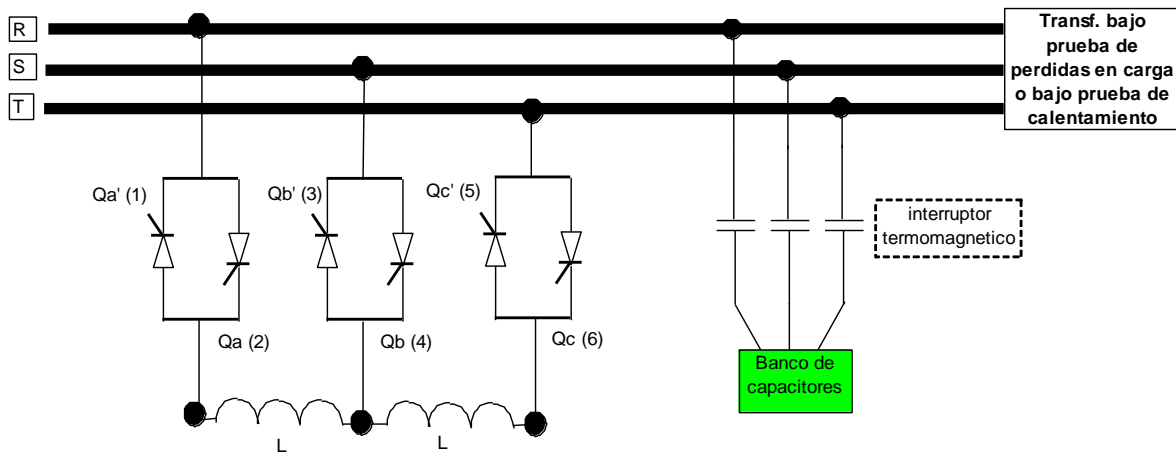


Figura 5.15 Circuito de potencia (actuador)

Dicho circuito se construyó a escala con inductores de 1,4H/3A. Este tipo de topología es más económica ya que, considera menos arrollamientos y más elementos de estado sólido; comparado con una conexión delta o estrella equivalente (conexiones delta y estrella requieren tres inductores) [2], [3].

La figura 5.16 presenta la geometría de la inductancia construida y su apariencia final, los valores de mH se calculan a partir de los capacitores y del tamaño de la carga a compensar. Como se trata de un montaje experimental se usaron capacitores de pequeño tamaño disponibles comercialmente con tamaños desde los 5 hasta 12.5 vares y como carga se utilizó un pequeño motor AC de 1/2 hp.

En cuanto al banco de capacitores se diseñaron por 3 etapas de compensación (5, 7.5 y 12.5 kVAR) en conexión delta que requiere menor corriente circulante que la conexión estrella.

Inductancia de Nucleo de aire

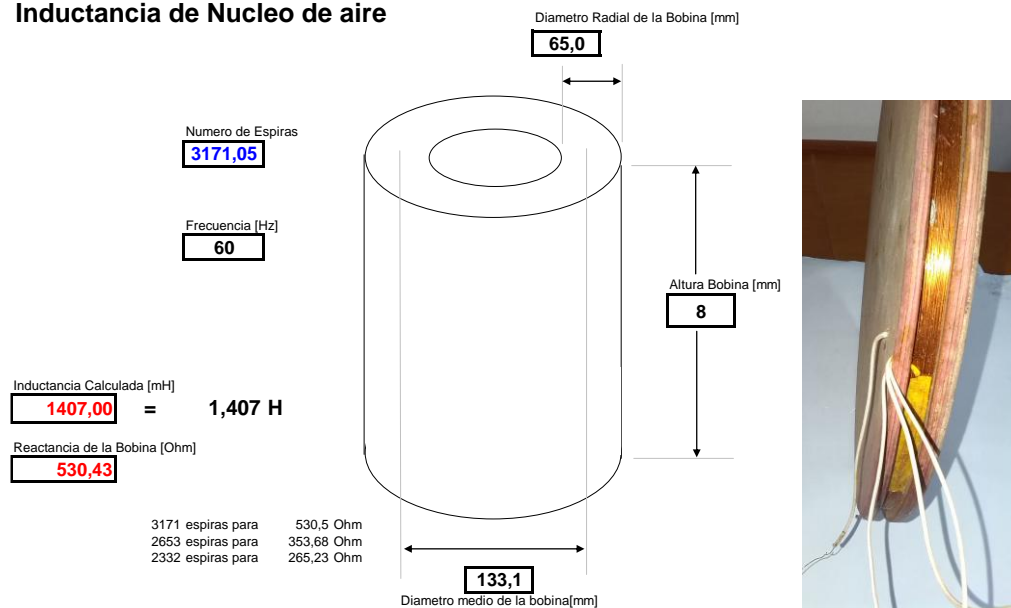


Figura 5.16 Inductancia L. Diseño y construcción final.

Debido a la baja frecuencia de switcheo (60Hz), a la alta estabilidad de la respuesta de la mayoría de los algoritmos simulados y al amplio rango de error permitido ($\pm 10\%$ del voltaje de referencia); no se aprecia un alto contenido de armónicos en la señal de salida. Por esta razón no se implementó una etapa de filtrado de armónicos para eliminar las corrientes distorsionadas que pudiera inyectar el SVC durante su operación.

Una visión del sistema implementado completo se aprecia en la figura 5.17, donde un microprocesador Motorola GP32 genera a través de una subrutina de control una señal de disparo (u), que es inyectada a la compuerta G del tiristor en la etapa de potencia por medio de un optoacoplador (MOC3021) y el tiristor finalmente controla la potencia vista por la carga.

5.10 SUPERVISION DEL PROCESO DE CONTROL

La figura 5.18 exhibe tres características del sistema como respuesta al actuador. El punto A, donde $V = \pm 10\% V_0$ ($V_0 = V_{Ref}$), $I = 0$ operación nominal. Si el voltaje se incre-

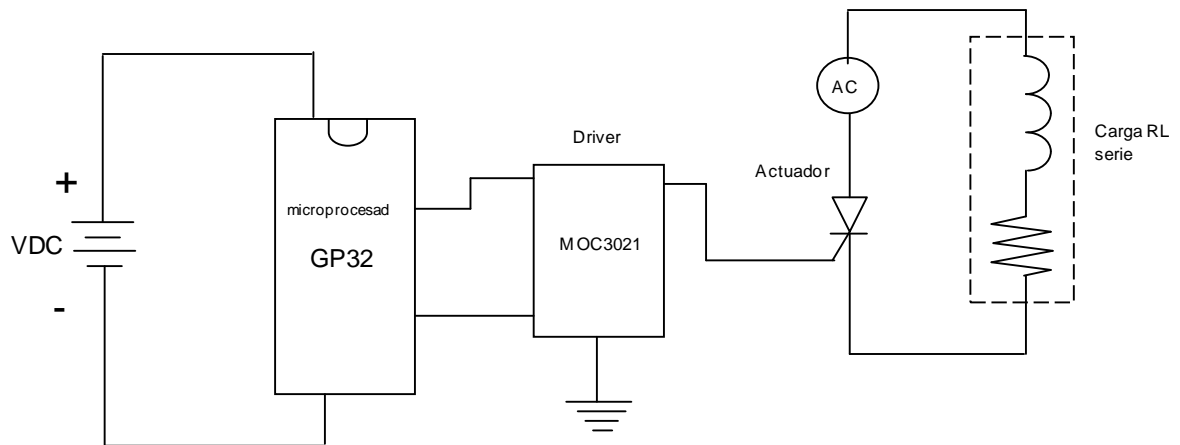


Figura 5.17 Esquema del circuito de control y potencia

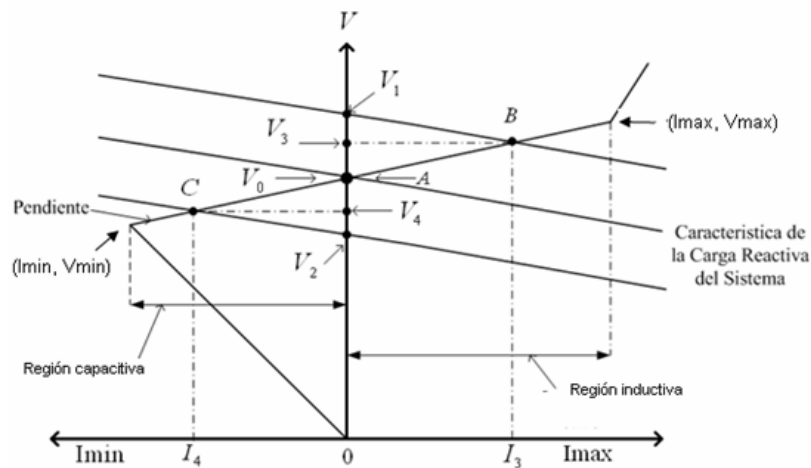


Figura 5.18 Comportamiento del SVC

menta debido a una carga capacitiva, el voltaje se eleva a V_1 . Pero, gracias a la presencia del SVC el punto de operación se mueve al punto B indicando una absorción de corriente inductiva y en consecuencia un voltaje menor V_3 . De manera similar si el voltaje cae al valor V_2 por presencia de carga inductiva; la acción del SVC aplica compensación capacitiva haciendo que el voltaje suba al nivel V_4 .

La pendiente de la recta dada entre los puntos (I_{\min}, V_{\min}) e (I_{\max}, V_{\max}) describe el comportamiento del SVC como regulador de tensión proporcional al error en estado

estacionario. Las tensiones V_{\min} y V_{\max} oscilan en el rango $\pm 10\% V_{\text{Ref}}$ y determinan el grado de precisión del control.

El algoritmo de control monitorea la señal de voltaje en la salida de manera que se prevenga de manera anticipada la presencia de un error por encima del valor permitido, y determina la acción de control del SVC (control del fp de la carga). La frecuencia de operación del algoritmo es la frecuencia de la red (60Hz), genera bajo switcheo en los tiristores (bajo nivel de armónicos), pero una lenta respuesta a trasientes de voltaje.

Si el fp de la carga (transformador en prueba de pérdidas de vacío o bajo carga y/o calentamiento) es inductivo entran a compensar los capacitores, la tensión en la salida tiende a subir por encima del valor de referencia (compensar con reactancia); por el contrario, si el fp es capacitivo son las inductancias quienes inyectan la corriente hacia la carga hasta que la tensión tienda a bajar por debajo del valor de referencia (compensar con inductancia).

5.11 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se presentan las gráficas de error de voltaje, derivada del error y salida del sistema (e, de, u) para control de rama inductiva; correspondientes a cada algoritmo probado. Se trata de un buen índice del adecuado o inadecuado comportamiento del sistema de control implementado.

La figura 5.19 presenta las curvas reales del modelo del SVC controlado por medio del algoritmo neurodifuso de Chao Et Al. La respuesta del control (salida u) es bastante inmune a los cambios de la entrada e y su derivada de.

En cuanto a la figura 5.20 presenta la salida u , con las mismas entradas de la figura 5.19. Ahora el control se hace por medio del algoritmo de control neurodifuso formulado por Li Xi Wang cuya salida u ; difiere en comparacion con la salida de Chao Et Al por la alta variacion coincidente con las oscilaciones del error e .

La figura 5.21 por otro lado presenta los resultados para el algoritmo de control difuso de nueve reglas; se aprecia un aumento de amplitud y cambios en la forma de onda de la salida u comparado con el algoritmo Chao Et Al.

Las tendencias presentadas en la figura 5.21 se aprecian en la figura 5.22, generada por un SVC controlado por un algoritmo difuso de 9 reglas basado en un control clásico PI. Ahora la salida u tiene un crecimiento notable y su respuesta es mas parecida al error e .



Figura 5.19 Resultados reales modelo SVC con algoritmo Chao Et Al

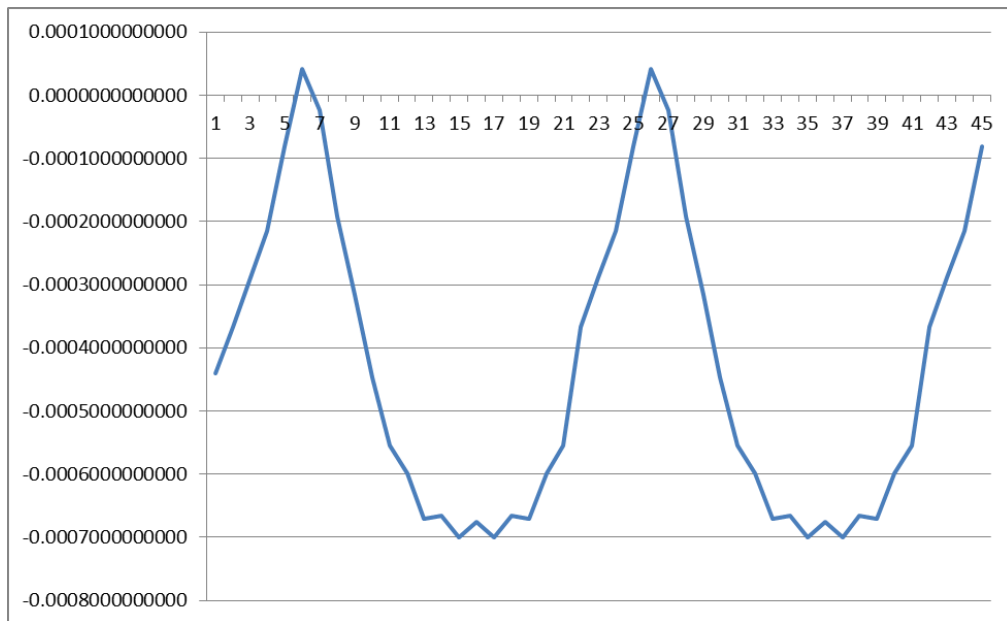


Figura 5.20 Resultados reales modelo SVC con algoritmo Li Xi Wang

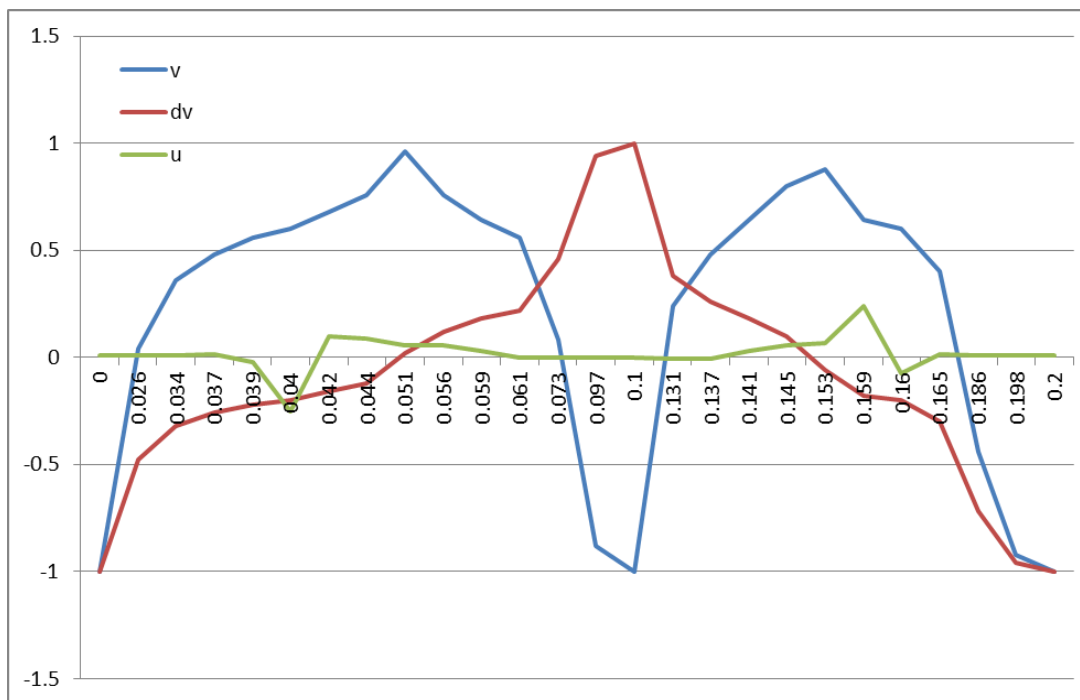


Figura 5.21 Resultados reales modelo SVC con algoritmo difuso nueve reglas

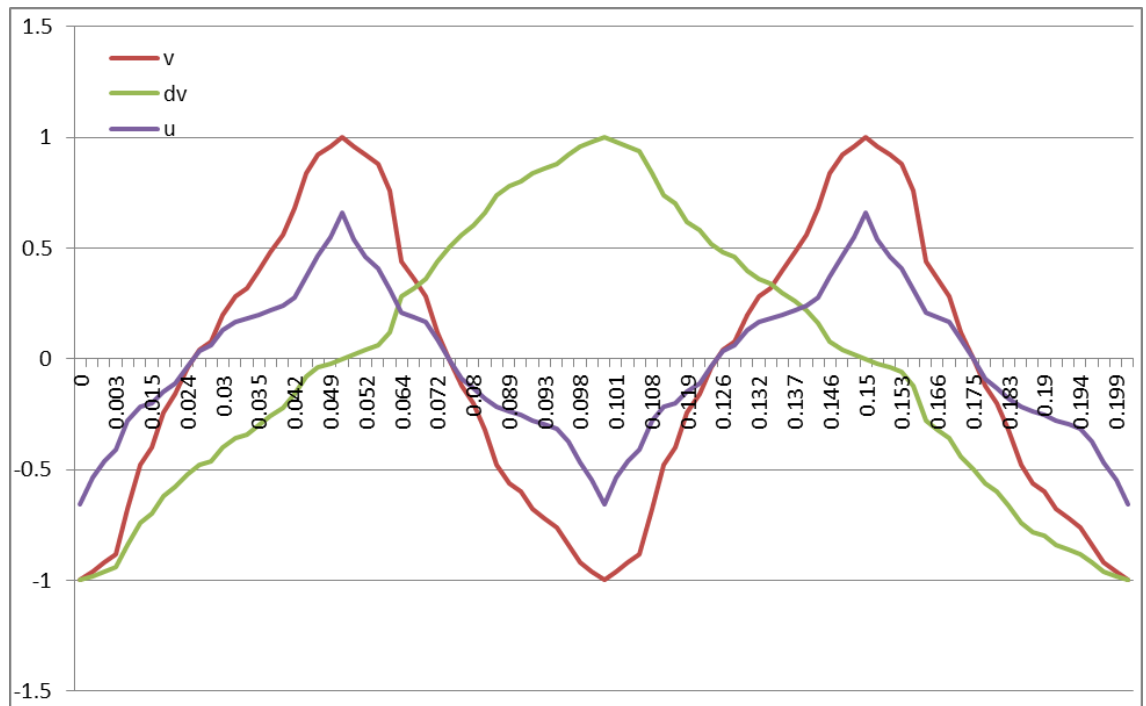


Figura 5.22 Resultados reales SVC algoritmo de control nueve reglas basado PI

Las estrategias de control difuso de 49 reglas y de control neurodifuso entrenado por algoritmos genéticos no fueron probadas en el prototipo. Si se comparan los datos obtenidos con el prototipo real; con los resultados obtenidos mediante la simulación en PSCAD no se encuentran diferencias muy notorias, y el comportamiento de la salida u es muy aproximado.

Al observar el capítulo cuatro vemos que el desempeño de estos dos algoritmos no es el mejor (ver tabla 5, capítulo cuatro), por tal motivo se determina que es innecesario realizar la prueba de dichos algoritmos en el prototipo.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- [1] M68HC08 Microcontrollers. MC68HC908GP32 Data Sheet.
www.freescale.com.
- [2] K. R. Padiyar. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution.
- [3] MUHAMMAD H. Rasid, Virgilio González y Pozo Agustín Suárez Hernandez.
Electrónica de potencia : circuitos, dispositivos y aplicaciones.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

El proceso de control del SVC para compensación de reactivos durante la prueba de medición pérdidas ó durante la prueba de calentamiento de un transformador de distribución; es un buen ejercicio de aplicación para la teoría de control moderna y de inteligencia artificial; enmarcada sin duda por la no linealidad del sistema y por la drástica variación en el fp que presenta el modelo circuital del transformador.

Como herramienta de apoyo, el simulador brinda un excelente soporte para la toma de decisiones y para la escogencia del más adecuado camino económico-práctico. La correcta simulación determina la más adecuada de las estrategias de control y desvirtúa la creencia de que, la mejor solución es siempre el más elaborado y complejo de los algoritmos (como es el caso del criterio evolutivo y selección natural que requieren los algoritmos genéticos), ni tampoco la más sencilla de las estrategias de control (clásico PI). Demostrando también la gran ventaja del control difuso sobre el control clásico, que no requiere un conocimiento previo de las ecuaciones de estado de la planta para el adecuado funcionamiento del esquema de compensador de reactivos.

El tipo de planta a controlar; la rapidez y tipo de respuesta, son los criterios más importantes para la selección de la estrategia de control. Para el caso del SVC aplicado a un transformador eléctrico de distribución en prueba de medición de pérdidas o durante la prueba de calentamiento, una rapidez de respuesta alta con bajo rizado (bajo THD), generará bajo switcheo, bajo costo en equipamiento y prolongada vida útil de los actuadores. Por el contrario una rapidez de respuesta lenta y un alto rizado (alto THD)

demandará gran exigencia de los actuadores (altos costos de mantenimiento e inversión inicial) y un detrimento adicional de la vida útil de dichos dispositivos.

Este grupo de soluciones analizadas, simuladas e implementadas pueden ser aplicadas a cualquier sistema eléctrico de distribución; donde las respuestas a obtener tendrán la misma consistencia de los gráficos presentes en los capítulos cuatro y cinco, si y solo si, las cargas a alimentar son del tipo RL con bajo fp. Sin embargo, de presentarse cualquier otro tipo de carga a compensar; las estrategias de control operarán de manera adecuada, buscando proporcionar la tensión de salida más cercana posible a la tensión de referencia (menor error en la tensión de salida). Aunque probablemente la estrategia más eficaz difiera de la estrategia recomendada en el presente trabajo.

6.1 FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACION

Los algoritmos genéticos son una buena alternativa de control observada en muchas aplicaciones prácticas, sin embargo, en el presente trabajo los resultados obtenidos no alcanzaron un mejor desempeño comparado con el entregado por el control neurodifuso, (rizado en la respuesta (alto THD)). Esto indica que aun es recomendable realizar ajustes al algoritmo que le permitan mejorar su operación, explorar variaciones en la población y otras posibles estrategias de optimización de los antecedentes y consecuentes es otra interesante opción para futuros trabajos.

Desde el punto de vista circuital la aplicación del sistema trifásico es una opción que no fue implementada en esta investigación, constituyendo un buen campo de desarrollo y base de proyectos futuros. Se deja planteado también, el uso de tarjetas de control para manejo de los tiristores, de tal forma que se pueda ampliar la capacidad de las corrientes

a controlar donde se apliquen conceptos modulares de conectividad y solo se requiera la programación de los algoritmos propuestos.

También se propone explorar la posible implementación de los algoritmos de control usando un microcontrolador más pequeño como el PIC 16F84 que permita atender las tareas propuestas reduciendo el espacio físico y el costo del montaje, sin pérdida de calidad en las respuestas obtenidas, dada la baja frecuencia de switcheo solicitada

Otra alternativa de montaje que se puede utilizar es usando un PLC para implementar el control, aprovechando la sencillez de los algoritmos y la facilidad para crear la lógica de switcheo haciendo incluso extensiva la aplicación a sistemas trifásicos y manejando desde el PLC las ramas inductiva y capacitiva (continua y discreta) del controlador.

Con relación al voltaje de prueba es de anotar que debido a que depende del tipo de transformador, la conexión, los voltajes de entrada y de salida y de la impedancia del mismo; este valor se debe poder modificar y/o actualizar de manera practica y directa antes de iniciar la prueba de perdidas en vacío o la prueba de perdidas en carga a dicho transformador. Se deja planteado el uso de sensores de voltaje que permitan la selección automática de dicho nivel de voltaje sin tener que ingresar el dato por programación.